



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

RAFAEL NAVET DE SOUZA

**UTILIZAÇÃO DE ALUMÍNIO PARA BLINDAGEM DE CAMPO MAGNÉTICO DE 60 HZ
EM SALA DE EXAMES DE IMAGEM POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**

***USING ALUMINUM FOR 60 HZ MAGNETIC FIELD SHIELDING IN MAGNETIC
RESONANCE IMAGING EXAM ROOM***

**CAMPINAS
2018**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

RAFAEL NAVET DE SOUZA

**UTILIZAÇÃO DE ALUMÍNIO PARA BLINDAGEM DE CAMPO MAGNÉTICO DE 60 HZ
EM SALA DE EXAMES DE IMAGEM POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**

***USING ALUMINUM FOR 60 HZ MAGNETIC FIELD SHIELDING IN MAGNETIC
RESONANCE IMAGING EXAM ROOM***

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Engenharia Biomédica.

Master dissertation presented to the School of Electrical and Computer Engineering of the University of Campinas in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Sciences in Electrical Engineering, in the area of Biomedical Engineering.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Santos Mühlen

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO RAFAEL NAVET DE SOUZA E ORIENTADO
PELO PROF. DR. SÉRGIO SANTOS MÜHLEN

Assinatura do Orientador

**CAMPINAS
2018**

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

So89u Souza, Rafael Navet de, 1984-
Utilização de alumínio para blindagem de campo magnético de 60 Hz em sala de exames de imagem por ressonância magnética / Rafael Navet de Souza. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Sérgio Santos Mühlen.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Blindagem magnética. 2. Ressonância magnética. 3. Compatibilidade eletromagnética. I. Mühlen, Sérgio Santos, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Using aluminum for 60 Hz magnetic field shielding in magnetic resonance imaging exam room

Palavras-chave em inglês:

Magnetic shielding

Magnetic resonance imaging

Electromagnetic compatibility

Área de concentração: Engenharia Biomédica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Sérgio Santos Mühlen [Orientador]

César José Bonjuani Pagan

Edna Marina de Souza

Data de defesa: 23-02-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Rafael Navet de Souza RA: 096414

Data da Defesa: 23 de Fevereiro de 2018

Título da Tese: “Utilização de Alumínio para Blindagem de Campo Magnético de 60 Hz em Sala de Exames de Imagem por Ressonância Magnética”

Prof. Dr. Sérgio Santos Mühlen (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Prof.^a Dra. Edna Marina de Souza (CEB/UNICAMP)

Prof. Dr. César José Bonjuani Pagan (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Dedico este trabalho à minha mãe, Rosana Navet, sem ela nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer à minha mãe, Rosana Navet, ao meu irmão e à sua esposa, Diego Navet de Souza e Thamires A. O. B. de Souza, e aos meus sobrinhos, Luiz Henrique e Mariana, pelo amor incondicional, apoio e compreensão que tiveram comigo durante todos os momentos juntos e nos momentos em que tive que me ausentar.

Ao meu orientador, professor Dr. Sérgio Santos Mühlen pela oportunidade, orientação, aprendizado, confiança e paciência.

Aos professores Dr. Ijar Milagre da Fonseca e Me. Gustavo Gustavsson Detthow por serem minhas referências acadêmicas, pelo apoio e incentivo durante toda minha trajetória acadêmica.

Ao professor Dr. Cesar José Bonjuani Pagan pelo apoio, ensinamentos, atenção e paciência durante todo desenvolvimento deste projeto.

Ao amigo Eng. Heitor Ernesto Iório pelo apoio, incentivo e ajuda durante o desenvolvimento dos experimentos, principalmente cedendo o espaço para criação de nosso laboratório de testes.

Ao amigo e gerente Ricardo Marques de Lima pelo apoio, incentivo e por acreditar em meu potencial na vida acadêmica e profissional.

À amiga Dra. Edna Marina de Souza pelo apoio, incentivo e ajuda nos momentos difíceis.

Ao amigo Dalmacio A. Justo pelo apoio, incentivo e transferência de conhecimento no início do projeto.

Aos amigos Me. Luis Eraldo Cassias Pereira e Me. Alisson Luiz Roman da empresa Comsol pelo apoio, incentivo, paciência e transferência de conhecimento sobre simulação computacional.

Aos amigos Me. Alexandre Milagre e Me. Luiz Jovelli da Siemens Ltda. pelo apoio, incentivo e ajuda durante as simulações.

Aos amigos Alberto Rambo e Daniel Albino pelo apoio, incentivo e durante toda execução do projeto.

Aos amigos Lourimar Moraes, Luan Franlin e Daniel Silva pelo apoio, incentivo e ajuda durante o período de preparação da apresentação.

Aos amigos Pedro Elias e Mariana Elias pelo apoio, incentivo e transferência de conhecimento no início do projeto.

Aos amigos e colegas de trabalho pelo apoio, incentivo, ajuda e ensinamentos, em especial a Dhiego Lofiego, Wagner Lopes, Alexandre Riscado, Julio Queiroz, Thereza Gobetti, Bernhard Heinrich, Michael Schraut, Walquir Fernandes, Anderson Diniz, Fabio Amorim e Rodrigo Camargo.

Aos amigos e colegas que me apoiaram e incentivaram durante todo este percurso, em especial: Arnaldo Fim, Jeferson Genaro, Tiago Gois, Juan Pablo Macassi, Stefan Ehrlich, Isabela Franklin, Marcia Lorenzini, Teresa Cántaro, Fernanda Cozatti, María Garnica, Aline Stefan, Michele Almeida, Paula Marangon, Sarah Kinaip, Leandro Loriggio, Anderson Ramos e Paola Soto.

Ao professor Dr. Aldo Canova pela abertura e oportunidade para discussão deste projeto.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Biomédica e Centro de Engenharia Biomédica, especialmente pelo apoio e incentivo do professor Dr. Eduardo Tavares Costa.

À amiga Eng. Nayane Bellot pelo apoio, incentivo e ajuda durante o desenvolvimento e execução dos experimentos que foi fundamental para otimização de tempo e recursos.

Ao Dr. Volker Weissenberger da Siemens Healthcare GmbH, por gentilmente ceder uma imagem importante ao trabalho.

À Siemens Healthineers Brasil pelo apoio financeiro e empréstimo dos equipamentos de medição.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Imagem por ressonância magnética (IRM) é uma técnica que produz imagens tomográficas 3-D (volumétricas) do corpo humano. Estas imagens oferecem informações anatômicas de alta resolução sem o uso de radiações ionizantes. Há, portanto, uma demanda crescente por equipamentos de IRM em clínicas e hospitais. Motivado por esta demanda e pela dificuldade na escolha do local para instalação destes equipamentos devido às fontes de campo magnético de 60 Hz de alta intensidade, este estudo foi realizado com o objetivo de apresentar uma solução prática para a blindagem de campo magnético de 60 Hz no ambiente hospitalar.

Em função dos princípios físicos de funcionamento dos equipamentos de IRM, a qualidade das imagens é muito influenciada por campos magnéticos do ambiente, em especial de 60 Hz, o que resulta na necessidade de blindar o espaço onde os equipamentos são instalados. Este estudo propõe a utilização de alumínio na confecção de blindagens de salas de IRM pelas diversas vantagens que este material apresenta e que se manifestam em melhor relação custo/benefício em curto e longo prazos, quando comparado com materiais ferromagnéticos. É apresentado o cálculo analítico, experimentos e simulação computacional da eficácia de blindagens com geometrias retangulares construídas com Ferro-Silício (Fe-Si) de grão não orientado (GNO), e com alumínio. A curva de eficácia da blindagem de alumínio é semelhante à do Fe-Si GNO em 60 Hz. São discutidas outras vantagens construtivas das blindagens de alumínio para campo magnético de 60 Hz e blindagem de radiofrequência.

Palavras-chave: Blindagem magnética, Ambiente hospitalar, Ressonância magnética, Compatibilidade eletromagnética.

ABSTRACT

Magnetic resonance imaging (MRI) is a technique that produces 3-D (volumetric) tomographic images of the human body. These images provide high resolution anatomical information without the use of ionizing radiation. There is, therefore, a growing demand for MRI equipment in clinics and hospitals. Motivated by this demand and the difficulty in choosing the location for the installation of these equipments due to high intensity 60 Hz magnetic field sources, this study was carried out with the objective of presenting a practical solution for the 60 Hz magnetic field shield in the environment.

As function of the physical principles of MRI equipment, the quality of images is strongly influenced by environmental magnetic fields, in particular 60 Hz, which results in the need to shield the space where the equipment is installed. This study proposes the use of aluminum in the construction of MRI room shields for the various advantages that this material presents and which are more cost effective in short and long terms when compared to ferromagnetic materials. We present the computational calculation, experiments and computational simulation of shielding efficacy for rectangular geometries constructed with Ferro-Silicon (Fe-Si) of non-oriented grain (NGO), and with aluminum. The efficacy curve of the aluminum shielding is similar to that of Fe-Si NGO at 60 Hz. Other constructive advantages of aluminum shields for 60 Hz magnetic field and radio frequency shielding are discussed.

Keywords: *Magnetic shielding. Magnetic resonance imaging. Electromagnetic compatibility. Hospital environment.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição das linhas de campo de superfície geradas por um magneto de 1,5 T (Adaptado de GE, 2018).	22
Figura 1.2 – Em ambas as imagens foi realizada uma sequência “ <i>spin echo</i> ” com tempo de eco $TE = 20$ ms. A figura (a) apresenta uma imagem realizada sem a influência de campo magnético A.C., enquanto na imagem (b) nota-se a influencia do campo magnético A.C. gerado propositalmente (imagem gentilmente cedida pelo Dr. Volker Weissenberger, Siemens Healthcare GmbH).	23
Figura 3.1 – Campo magnético em um ponto genérico P devido a $I dl$	27
Figura 3.2 – Condutor retilíneo (adaptado de CHENG, 2008).	28
Figura 3.3 – Pode-se atenuar a interferência blindando o equipamento vítima ou a(s) fonte(s). Na maioria dos casos é mais econômico blindar a(s) fonte(s) do que a vítima, devido à menor quantidade de material utilizado (adaptado de SALINAS, 2003).	30
Figura 3.4 – Princípios de blindagens metálicas: (a) material ferromagnético - confinamento das linhas de campo devido à baixa relutância; (b) material condutivo – campo magnético é repelido pelas correntes parasitas induzidas (SALINAS, 2003).	30
Figura 3.5 – Blindagem com geometria retangular (t é a espessura [m], a e b representam comprimento e largura [m], J é a densidade de corrente, H_i e H_o representam o campo magnético no interior e exterior da blindagem respectivamente) – vista superior (Adaptado de COOLEY, 1968).	37
Figura 4.1 – Circuito utilizado para desenvolvimento do projeto computacional e experimental, foi utilizado um cabo condutor em formato de espira retangular para gerar o campo magnético, os pontos P1-P5 são os pontos de medição que representam a posição do centro da blindagem.	41
Figura 4.2 – Projeto utilizado para desenvolvimento da estrutura metálica utilizada nos experimentos e na simulação computacional.	41
Figura 4.3 – É possível visualizar nesta figura 18 da estrutura utilizada para suporte das chapas metálicas (1 dos 8 vértices do cubo), devido à utilização de planos de simetria.	43
Figura 4.4 – Chapas metálicas sobrepostas a estrutura metálica.	43

Figura 4.5 – Circuito utilizado no modelo computacional semelhante ao proposto na Figura 4.1.	44
Figura 4.6 – Formação de descontinuidades nas arestas da blindagem conforme o aumento da espessura da blindagem <i>gaps</i> durante a construção do modelo experimental.	45
Figura 4.7 – <i>Gap</i> representando as imperfeições nas junções das chapas metálicas.	45
Figura 4.8 – Detalhe do <i>gap</i>	46
Figura 4.9 – Detalhes das faces da estrutura metálica.....	48
Figura 4.10 – Estrutura metálica com kit de rodízios.	49
Figura 4.11 – Estrutura metálica com rodízio e uma das placas para teste no fundo.	50
Figura 4.12 – Chapas metálicas montadas na estrutura.....	50
Figura 4.13 – Circuito utilizado para gerar corrente elétrica controlada e campo magnético de 60 Hz.....	51
Figura 4.14 – Aquecedores 1.500 W, 127 V (valores nominais).....	51
Figura 4.15 – Suportes de madeira.....	52
Figura 4.16 – Suporte de madeira com cabo flexível.....	52
Figura 4.17 – Marcação no piso do posicionamento central do sensor variando a distância de 1 a 5 metros.	53
Figura 4.18 – Marcação no piso do posicionamento central do sensor variando a distância de 1 a 5 metros.	53
Figura 4.19 – Sensor fixado no interior da estrutura metálica.....	54
Figura 4.20 – Configuração do sistema de medição de campo magnético (Adaptado de STL-GMBH, 2016).....	54
Figura 4.21 – Configuração do sistema de medição de campo magnético.	55
Figura 4.22 – Configuração do sistema de medição de campo magnético.	55
Figura 4.23 – Interface gráfica do <i>software</i> Gradmag [®]	56
Figura 5.1 – Eficácia da blindagem para frequência de 60 Hz de alumínio e FE-Si GNO.....	59
Figura 5.2 – Gráfico da eficácia da blindagem utilizando alumínio.	65
Figura 5.3 – Gráfico da eficácia da blindagem utilizando Fe-Si GNO.....	67
Figura 5.4 – Comparação entre os resultados da densidade de fluxo magnético (<i>B</i>) obtidos a partir do modelo analítico, experimentação e simulação computacional. Valores expressos em <i>B_{pp}</i> [nT].....	68

Figura 5.5 – Gráfico comparativo dos experimentos variando a espessura de Alumínio e Fe-Si GNO.....	69
Figura 5.6 – Gráfico comparativo dos experimentos variando a espessura de Alumínio e Fe-Si GNO.....	69
Figura 5.7 – Gráfico comparativo dos resultados de EB obtidos a partir do cálculo analítico, experimentação e simulação computacional, variando o material (Al e Fe-Si GNO) e a espessura da blindagem.....	75
Figura 5.8 – Gráfico comparativo entre os resultados experimentais e computacionais considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm em todas as arestas da blindagem utilizando alumínio.....	78
Figura 5.9 – Gráfico comparativo entre os resultados experimentais e computacionais considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm em todas as arestas da blindagem utilizando Fe-Si GNO....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Especificação para instalação de um equipamento de IRM (Adaptado de GE, 2018).	22
Tabela 1.2 – Influência da densidade de fluxo magnético B_{max} em equipamentos externos (Adaptado de GE, 2018).	23
Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens na utilização do Fe-Si GNO em blindagens de salas de equipamentos de IRM.	32
Tabela 3.2 – Vantagens e desvantagens na utilização do alumínio em blindagem de salas de equipamentos de IRM.	32
Tabela 4.1 – Condutividade (σ) aproximada do alumínio e Fe-Si GNO, em siemens por metro (S/m) (GOLTZ, 2012; SMITHS METAL, 2017; COGENT POWER, 2017).	40
Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na simulação.	47
Tabela 5.1 – Densidade de fluxo magnético B gerado pela corrente de $52,04A_{pp}$ no cabo condutor.	58
Tabela 5.2 – Eficácia da blindagem a partir do cálculo analítico.	59
Tabela 5.3 – Densidade de fluxo magnético B gerado pelo cabo condutor sem estrutura metálica.	60
Tabela 5.4 – Densidade de fluxo magnético (B) que emerge a partir da blindagem utilizando alumínio (COMSOL).	60
Tabela 5.5 – Eficácia da blindagem utilizando alumínio.	61
Tabela 5.6 – Densidade de fluxo magnético (B) que emerge a partir da blindagem utilizando Fe-Si GNO (COMSOL).	61
Tabela 5.7 – Eficácia da blindagem utilizando Fe-Si GNO.	62
Tabela 5.8 – Densidade de fluxo magnético B residual sem estrutura metálica.	62
Tabela 5.9 – Densidade de fluxo magnético B residual com a estrutura metálica.	63
Tabela 5.10 – B gerado por uma corrente de $52,04 A_{pp}$, sem estrutura metálica.	63
Tabela 5.11 – B gerado por uma corrente de $52,04 A_{pp}$, com estrutura metálica.	64
Tabela 5.12 – Densidade de fluxo magnético (B) que emerge a partir da blindagem utilizando alumínio.	64
Tabela 5.13 – Eficácia da blindagem utilizando alumínio.	65

Tabela 5.14 – Densidade de fluxo magnético (B) que emerge a partir da blindagem utilizando Fe-Si GNO.	66
Tabela 5.15 – Eficácia da Blindagem utilizando Fe-Si GNO.....	66
Tabela 5.16 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 1 (1 m da fonte) para o Fe-Si GNO.....	70
Tabela 5.17 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 2 (2 m da fonte) para o Fe-Si GNO.....	70
Tabela 5.18 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 3 (3 m da fonte) para o Fe-Si GNO.....	71
Tabela 5.19 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 4 (4 m da fonte) para o Fe-Si GNO.....	71
Tabela 5.20 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 5 (5 m da fonte) para o Fe-Si GNO.....	72
Tabela 5.21 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 1 (1 m da fonte) para o alumínio.....	72
Tabela 5.22 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 2 (2 m da fonte) para o alumínio.....	73
Tabela 5.23 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 3 (3 m da fonte) para o alumínio.....	73
Tabela 5.24 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 4 (4 m da fonte) para o alumínio.....	74
Tabela 5.25 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 5 (5 m da fonte) para o alumínio.....	74
Tabela 5.26 – Densidade de fluxo magnético (B) que emerge a partir da blindagem considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm utilizando alumínio.....	76
Tabela 5.27 – Eficácia da blindagem considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm utilizando alumínio.	76
Tabela 5.28 – Densidade de fluxo magnético (B) que emerge a partir da blindagem considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm utilizando Fe-Si GNO.....	77
Tabela 5.29 – Eficácia da blindagem considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm utilizando Fe-Si GNO. .	77

Tabela 5.30 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 1 (1 m da fonte) para o alumínio.	79
Tabela 5.31 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 2 (2 m da fonte) para o alumínio.	79
Tabela 5.32 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 3 (3 m da fonte) para o alumínio.	80
Tabela 5.33 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 4 (4 m da fonte) para o alumínio.	80
Tabela 5.34 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 5 (5 m da fonte) para o alumínio.	81
Tabela 5.35 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 1 (1 m da fonte) para o Fe-Si GNO.	82
Tabela 5.36 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 2 (2 m da fonte) para o Fe-Si GNO.	83
Tabela 5.37 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 3 (3 m da fonte) para o Fe-Si GNO.	83
Tabela 5.38 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 4 (4 m da fonte) para o Fe-Si GNO.	84
Tabela 5.39 – Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um <i>gap</i> de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 5 (5 m da fonte) para o Fe-Si GNO.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B	Fator de correção de múltiplas reflexões
\vec{B}	Densidade de fluxo magnético
C.A.	Corrente Alternada
C.C.	Corrente Contínua
EB	Eficácia da Blindagem
Fe-Si	Ferro Silício
GNO	Grão Não Orientado
\vec{H}	Intensidade do campo magnético
IEM	Interferência Eletromagnética
IRM	Imagem por Ressonância Magnética
PA	Perdas por Absorção
PR	Perdas por Reflexão
RF	Rádio Frequência
RM	Ressonância Magnética
RNM	Ressonância Nuclear Magnética
TC	Tomografia Computadorizada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 OBJETIVO	26
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	27
3.1 CAMPO MAGNÉTICO EM UM CONDUTOR.....	27
3.2 BLINDAGEM.....	29
3.2.1 BLINDAGEM FERROMAGNÉTICA × BLINDAGEM CONDUTIVA EM SALAS DE RM	31
3.2.2 EFICÁCIA DA BLINDAGEM.....	33
3.2.2.1 PERDAS POR ABSORÇÃO (<i>PA</i>)	34
3.2.2.2 PERDAS POR REFLEXÃO (<i>PR</i>)	34
3.2.2.3 FATOR DE CORREÇÃO DE MÚLTIPLAS REFLEXÕES (<i>M</i>).....	36
3.2.3 CÁLCULO DA EFICÁCIA DA BLINDAGEM PARA GEOMETRIAS RETANGULARES	36
3.2.3.1 BLINDAGEM COM GEOMETRIA RETANGULAR.....	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1 CÁLCULO ANALÍTICO	39
4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	40
4.2.1 COMSOL Multiphysics®	42
4.2.2 Blindagem de campo magnético 60 Hz utilizando uma caixa metálica.....	42
4.2.3 <i>Gap</i>	44
4.2.4 Cálculos e parâmetros aplicados à simulação.....	46
4.3 EXPERIMENTOS.....	47
4.3.1 ESTRUTURA METÁLICA	48
4.3.2 CIRCUITO GERADOR DE CAMPO MAGNÉTICO	51
4.3.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO.....	54
4.3.4 PROTOCOLO DE TESTES	56
5 RESULTADOS	58
5.1 CÁLCULO ANALÍTICO	58
5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	60
5.3 EXPERIMENTOS.....	62

5.4 RESULTADOS COMPARATIVOS	67
5.5 RESULTADOS OBTIDOS APÓS A INSERÇÃO DE <i>GAPS</i> AO MODELO COMPUTACIONAL	75
5.5.1 RESULTADOS COMPARATIVOS CONSIDERANDO O <i>GAP</i>	78
6 DISCUSSÃO	85
6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS	89
7 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE I	95

1 INTRODUÇÃO

Equipamentos de imagem por ressonância magnética (IRM) utilizam campos magnéticos e ondas de radiofrequência (RF). A técnica se baseia no fenômeno de ressonância nuclear magnética (RNM), descoberto em 1938 e utilizado desde então para a análise de compostos químicos. A RNM é um fenômeno físico no qual o núcleo de um átomo de determinada substância, em presença de um campo magnético externo, absorve e emite energia na forma de RF. É possível determinar propriedades da substância através da correlação da energia absorvida em cada frequência do espectro magnético (na faixa de MHz), como uma espectroscopia.

Os campos magnéticos gerados pelo equipamento fazem os prótons dos átomos de hidrogênio das moléculas de água presentes no corpo humano se alinharem de maneira semelhante à agulha de uma bússola quando colocada próxima a um ímã. Quando um pulso de RF é gerado e irradia o corpo, alguns destes prótons absorvem a energia de RF e mudam de direção. Os campos dos ímãs nucleares individuais podem ser somados para criar um campo magnético resultante, que induz corrente em uma bobina ou antena receptora. Quando o pulso de RF cessa, os prótons retornam à sua posição original (alinhados com o campo magnético estático do equipamento), liberando a energia absorvida e induzindo corrente elétrica na antena (ou bobina), na forma de um pulso exponencialmente amortecido. Este sinal muito tênue é captado, processado e enviado a um sistema computacional para reconstrução da imagem anatômica.

Este sistema gera imagens com alto contraste entre tecidos moles, de longe superior ao da tomografia computadorizada (TC). Além disso, a técnica é intrinsecamente sensível ao ambiente químico em que se encontram os prótons, caracterizando-a como dependente do metabolismo e das disfunções que o modificam, como as patologias. Trata-se, portanto, de uma importante modalidade diagnóstica, pois possibilita a avaliação de grande variedade de partes do corpo de forma não invasiva e *in vivo*, fornecendo informações de interesse clínico tanto anatômicas e estruturais, quanto fisiológicas, onde a funcionalidade e o metabolismo dos órgãos são avaliados.

O planejamento para instalação de um sistema de IRM representa frequentemente um grande desafio técnico e econômico, oferecendo oportunidades de estudos para soluções inovadoras e criativas, desde que comprovadamente eficientes. As necessidades de instalação de cada sistema estão mudando rapidamente, seguindo a rápida evolução dos equipamentos de IRM,

a complexidade e a sensibilidade dos exames disponíveis, bem como do aumento das restrições físicas e níveis de interferência eletromagnética dos locais propostos para instalação.

A escolha do local e a preparação para uma instalação clínica de um equipamento de IRM requerem considerações especiais que não são encontradas previamente nos ambientes clínicos e hospitalares. A maioria desses ambientes não são planejados à luz das restrições e necessidades de funcionamento dos sistemas de IRM, requerendo por isso que sejam corretamente adaptados através de soluções técnicas apropriadas. Os fatores envolvidos na definição de um local para instalação de um equipamento de IRM em um centro de diagnóstico são muito mais críticos do que para outros equipamentos de imagem. Além dos requisitos habituais da fundação e estrutura adequados, devem ser considerados os efeitos desta estrutura na uniformidade do campo magnético e o efeito das linhas de campo magnético estático do magneto em outros dispositivos presentes no local (AAPM, 1986).

A prevenção de interferência eletromagnética (IEM) é um tema com importância crescente devido à abundância de fontes potenciais de interferências próximas a dispositivos eletrônicos susceptíveis, presentes no ambiente hospitalar. Equipamentos terapêuticos e de diagnóstico médico por imagem tendem a interferir uns nos outros em função das elevadas intensidades de campos eletromagnéticos gerados, e da possibilidade de acoplamento entre si e com dispositivos de telecomunicações (HONGTAO *et al.*, 2006).

Existem quatro tipos de blindagem para salas de exames de equipamentos de IRM, sendo três destinadas a mitigar as interferências externas e uma devido ao intenso campo magnético estático do magneto dos equipamentos. A blindagem de RF pode ser considerada blindagem padrão, pois está presente em todos os projetos. As demais blindagens são consideradas adicionais devidas às suas instalações ocorrerem apenas em projetos específicos e têm como função a contenção das linhas de campo magnético estático do magneto, blindagem de campo magnético de corrente contínua (C.C) e quase-C.C., e a atenuação de interferências externas causadas por campo magnético de corrente alternada (C.A.).

As frequências de RF em equipamentos de uso comercial variam entre 12 e 298 MHz, o que significa que é muito importante evitar que os campos de RF dispersos no ambiente afetem o equipamento de IRM. Por isso a blindagem RF é necessária em todas as instalações, uma vez que a sua ausência ou ineficácia resulta no empobrecimento da relação sinal/ruído das imagens, o que pode limitar ou comprometer o diagnóstico (CONTROLLED PWR, 2009).

Existem dois tipos principais de perturbações em equipamentos de IRM causados por campos magnéticos externos. O primeiro é muitas vezes referido como corrente contínua (C.C.) ou quase-C.C. Este tipo de distúrbio decorre da proximidade entre o equipamento de IRM e dispositivos que utilizam C.C. de alta intensidade em sua operação, que possuam grande massa metálica em sua estrutura e se movimentem, por exemplo, metrô, trens elétricos, bondes e equipamentos similares que operam com correntes elétricas C.C. de elevada intensidade. As fontes comuns de interferência quase-C.C. incluem automóveis, caminhões e outros objetos metálicos em movimento em estreita proximidade com a localização proposta para o equipamento de IRM.

O segundo tipo de interferência é criado por dispositivos elétricos operando com C.A., como transformadores, linhas de transmissão, cabos de potência, chaveamento de equipamentos e outras variações rápidas no valor ou orientação da corrente elétrica. Campos magnéticos de 50/60 Hz de alta intensidade podem afetar a qualidade da imagem em equipamentos de IRM (KELLOGG, 2008). Equipamentos que operam com RF na faixa de 12 a 298 MHz também podem causar interferências (CONTROLLEDPWR, 2009).

Equipamentos de IRM são susceptíveis a interferências externas, mas também podem interferir em outros equipamentos, pois devido à sua elevada intensidade de campo magnético, produzem linhas de campo magnético estático (C.C. puro) semelhante a um ímã, que podem interferir em equipamentos externos. A maior preocupação seria com a linha de 0,5 mT ou 5 Gauss conhecida como linha de “perigo”, que afeta diretamente o funcionamento de marca-passos e bioestimuladores. Esta linha de campo deve estar contida dentro da sala de exames ou confinada em uma área de acesso controlado e identificado. Caso as dimensões da sala não sejam suficientes para conter esta linha de campo em todas as direções, uma blindagem adicional se faz necessária.

A Figura 1.1 apresenta a distribuição das linhas de campo para um magneto de 1,5 T. A Tabela 1.1 apresenta as especificações para a instalação de um equipamento de IRM e a Tabela 1.2 apresenta a relação entre as linhas de campo magnético estático do magneto e os equipamentos que podem ser afetados por elas.

Tabela 1.2 - Influência da densidade de fluxo magnético B_{max} em equipamentos externos (Adaptado de GE, 2018).

B_{max} [mT]	Equipamento vítima
1	Tubos de raios X
0,5	Marca-passos, bioestimuladores e neuroestimuladores.
0,1	TC scanner, ultrassom e intensificadores de imagem.
0,05	Câmara nuclear.

Caso os valores de campos eletromagnéticos estejam acima da especificação aparecem artefatos nas imagens. Artefato é uma informação presente na imagem, mas que não faz parte do objeto sendo examinado (paciente). Aparece na imagem e pode ser confundido com uma lesão (falso positivo) ou reduzir a capacidade diagnóstica da imagem (falso negativo). No caso de interferência de campo magnético AC aparecem “fantasmas” na imagem, conforme ilustrado na Figura 1.2.

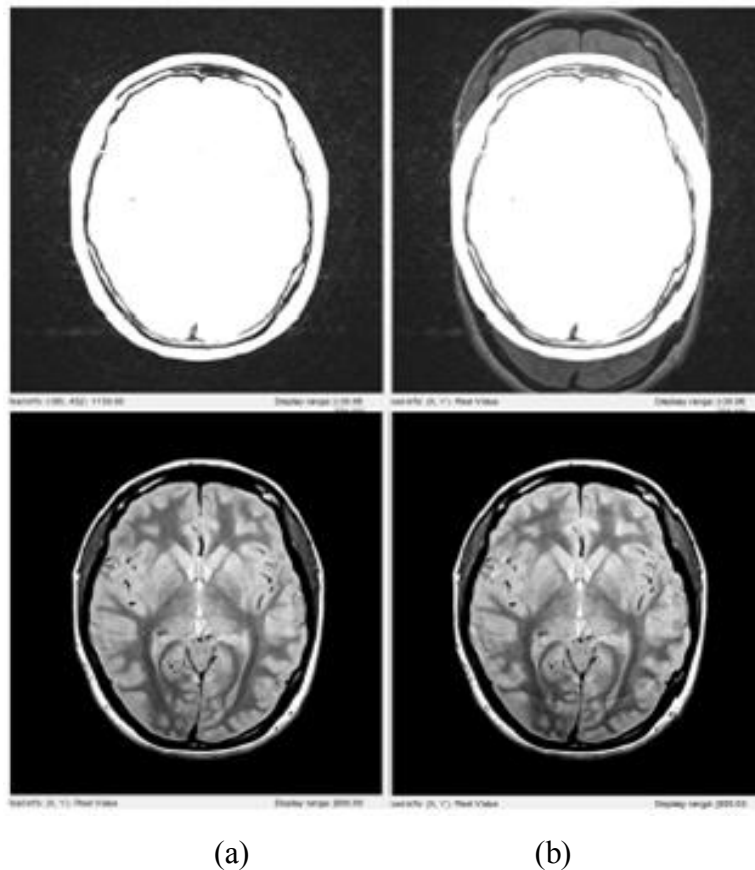


Figura 1.2 - Em ambas as imagens foi realizada uma sequência “*spin echo*” com tempo de eco $TE = 20$ ms. A figura (a) apresenta uma imagem realizada sem a influência de campo magnético A.C., enquanto na imagem (b) nota-se a influência do campo magnético A.C. gerado propositalmente (imagem gentilmente cedida pelo Dr. Volker Weissenberger, Siemens Healthcare GmbH).

Quando equipamentos de IRM são instalados em ambientes hospitalares, uma blindagem magnética é muitas vezes necessária para evitar a exposição não controlada do meio ambiente circundante ao forte campo de dispersão do magneto e também com a finalidade de reduzir a influência do campo magnético ambiental na homogeneidade do campo do magneto (ISHIYAMA e HIROOKA, 1991; NOGUCHI e ISHIYAMA, 1997; SCHWALL, 1987; THE JOINT COMMISSION, 2008). Esta blindagem geralmente é construída utilizando materiais ferromagnéticos, cuja não linearidade de suas propriedades magnéticas deve ser levada em consideração no projeto (YOSHIKAWA *et al.*, 2011). É possível utilizar bobinas de compensação (bobinas ativas) para mitigar a ação dos campos magnéticos espúrios, ou ambos (blindagem passiva e bobinas – solução híbrida) (ZUCCA *et al.*, 2011).

Materiais ferromagnéticos possuem alta permeabilidade magnética e são eficazes para contenção do campo magnético estático, C.C. e C.A., porém ao adotar este tipo de material para blindagens de campo magnético C.A. deve-se levar em consideração a saturação eletromagnética, que diminui substancialmente a sua capacidade de blindagem (YICHAO *et al.*, 2007). Considerando que no presente estudo a blindagem será aplicada para equipamentos de IRM que trabalham com alta intensidade de campo magnético (de 0,2 a 7 T), isso aumenta a probabilidade de saturação das chapas metálicas. Também poderiam ser utilizados para blindagem de RF, porém devido ao peso excessivo deste material e à complexidade para a sua instalação, que necessita de infraestrutura robusta para fixação das chapas, e a dificuldade para realizar as junções, estes materiais não são utilizados para esta finalidade, gerando a necessidade de instalação de uma segunda blindagem com outro tipo de material de mais fácil manuseio.

Em projetos de instalação de equipamentos de IRM, materiais condutivos são utilizados para a blindagem de RF devido à sua eficácia de atenuação de campos eletromagnéticos. Outras vantagens na utilização destes materiais são a facilidade de instalação, uma vez que seu peso inferior ao dos materiais ferromagnéticos dispensa infraestrutura especial para suporte, além da maior simplicidade na fixação das chapas e na realização das junções. Blindagens para campo magnético 50/60 Hz feitas com materiais condutivos apresentam eficácia de blindagem linear, não reduzindo com o aumento da distância.

Um dos fatores motivacionais deste trabalho é que no Brasil as blindagens que utilizam materiais condutivos, mais especificadamente o alumínio, estão presentes em todos os projetos de IRM para blindagem de RF. Materiais ferromagnéticos são utilizados apenas em casos especiais

onde se faz necessária a utilização de blindagem adicional para a contenção dos campos magnéticos C.C. e C.A. e o campo magnético estático do equipamento. Sendo assim, aproveitando que a blindagem de RF de alumínio já está presente em todos os projetos, acrescentar a esta a função de blindar campo magnético C.A. pode resultar na redução do tempo de instalação, tempo de preparação de alvenaria, risco de corrosão galvânica, custos do projeto, pois apenas um material será usado para ambas às blindagens.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização do alumínio em blindagem de campo magnético de 60 Hz em salas de exames de imagem por ressonância magnética.

Além disso, quantificar a eficácia dos tipos de blindagem usadas no Brasil (condutiva de alumínio e ferromagnética) e propor um novo padrão de blindagens que poderá ser aplicado no mercado nacional.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CAMPO MAGNÉTICO EM UM CONDUTOR

O estudo dos campos magnéticos produzidos pela passagem da corrente elétrica tem como ponto de partida a lei de Biot-Savart. Um elemento diferencial de corrente $I d\vec{l}$ produz um elemento diferencial de campo magnético $d\vec{H}$. A intensidade deste campo varia inversamente com o quadrado da distância entre o condutor da corrente elétrica e o ponto onde o campo magnético é considerado, é independente da vizinhança e possui direção e sentido dados pelo produto vetorial de $I d\vec{l}$ por \vec{a}_R , conforme ilustrado na Figura 3.1 (EDMINISTER, 2006).

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{a}_R}{4\pi R^2} \quad 3.1$$

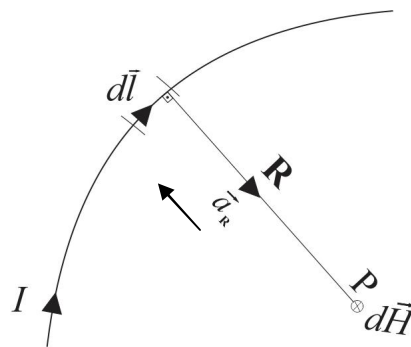


Figura 3.1 – Campo magnético em um ponto genérico P devido a $I d\vec{l}$.

Todos os elementos que formam a linha de corrente contribuem para o vetor intensidade de campo magnético \vec{H} e devem ser somados, considerando a sua distância e ângulo relativo. Se todas as contribuições de elementos de corrente em um caminho fechado forem somadas, obtém-se a forma integral da Lei de Biot-Savart para a intensidade de campo magnético \vec{H} resultante:

$$\vec{H} = \oint \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{a}_R}{4\pi R^2} \quad 3.2$$

Com esta equação 3.2 pode-se calcular de forma simples a intensidade de campo magnético total resultante num ponto de interesse P, decorrente da passagem de uma corrente de

intensidade I em um fio condutor retilíneo, cuja configuração geométrica é representada na Figura 3.2.

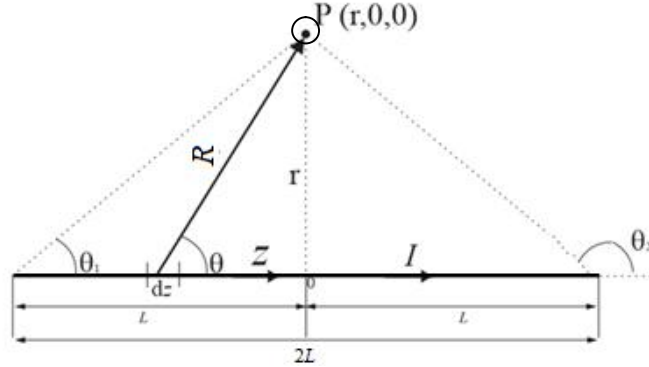


Figura 3.2 – Condutor retilíneo (adaptado de CHENG, 2008).

Aplicando a equação 3.2 para esta geometria tem-se:

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \frac{dz \sin \theta}{R^2} \hat{\phi} \quad 3.3$$

onde $\hat{\phi}$ é um vetor unitário que aponta perpendicularmente de trás para frente da página. Além disso:

$$z = r \cotg \theta \quad 3.4$$

$$dz = r \operatorname{cosec}^2 \theta d\theta \quad 3.5$$

$$R = r \operatorname{cosec} \theta \quad 3.6$$

Substituindo 3.5 e 3.6 em 3.3, obtém-se:

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \frac{r \operatorname{cosec}^2 \theta d\theta \sin \theta}{r^2 \operatorname{cosec}^2 \theta} \hat{\phi} = \frac{I}{4\pi r} \sin \theta d\theta \hat{\phi} \quad 3.7$$

A partir da integração ao longo dos ângulos de θ_1 a θ_2 , obtém-se:

$$\vec{H} = \int d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta \hat{\phi} = \frac{I}{4\pi r} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \hat{\phi} \quad 3.8$$

Em um caso simétrico onde $|\theta_2| = |\theta_1|$, o campo magnético em um ponto P estará localizado ao longo de sua mediatriz, considerando o comprimento do condutor $2L$, então:

$$\cos\theta_1 = \frac{L}{\sqrt{L^2 + r^2}} \quad 3.9$$

Substituindo a equação 3.9 em 3.8, tem-se o vetor campo magnético \vec{H} como:

$$\vec{H} = \frac{I L}{2\pi r \sqrt{L^2 + r^2}} \hat{\phi} \quad 3.10$$

No presente caso será conveniente trabalhar com a densidade de fluxo magnético \vec{B} devido ao sensor utilizado para a medição experimental expressar seus resultados desta forma, a qual está relacionada com a intensidade de campo magnético \vec{H} no espaço livre por:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad 3.11$$

onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] é a permeabilidade do espaço livre. Substituindo 3.8 em 3.11, tem-se:

$$\vec{B} = \frac{I \mu_0}{4\pi r} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \hat{\phi} \quad 3.12$$

Através da equação 3.12 pode-se calcular a densidade de fluxo magnético \vec{B} gerada pela corrente elétrica I em cada segmento de corrente da bobina retangular usada nos experimentos, descritos mais à frente. Esta equação será também utilizada quando os resultados do cálculo analítico de \vec{B} forem comparados com os resultados experimentais e computacionais.

3.2 BLINDAGEM

Blindagem é uma barreira metálica, colocada entre duas regiões do espaço e é utilizada para controlar a propagação de campos eletromagnéticos de uma região para a outra. As blindagens podem ser instaladas para circunscrever a fonte de perturbação eletromagnética ou o equipamento ‘vítima’ (alvo). A Figura 3.3 apresenta estas duas situações: campos gerados a partir de várias fontes afetando a região da vítima (por exemplo, uma sala de exames onde se encontra o equipamento de IRM). A figura permite perceber que a quantidade de material utilizado para blindar a fonte é geralmente menor e por isso é a opção mais econômica.

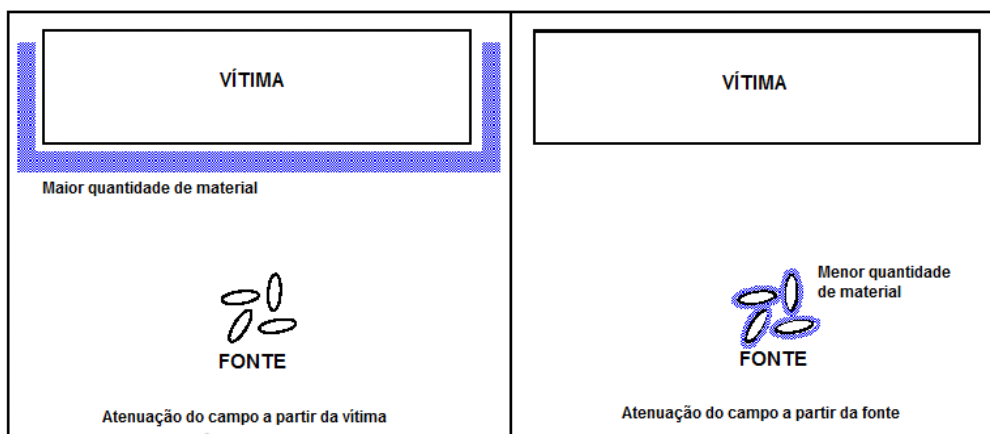


Figura 3.3 – Pode-se atenuar a interferência blindando o equipamento vítima ou a(s) fonte(s). Na maioria dos casos é mais econômico blindar a(s) fonte(s) do que a vítima, devido à menor quantidade de material utilizado (adaptado de SALINAS, 2003).

Blindagens podem ser construídas com materiais ferromagnéticos e/ou condutivos. Em baixas frequências, os mecanismos físicos envolvidos para cada material são diferentes. Em blindagens de materiais ferromagnéticos (magnetostáticas), o mecanismo predominante consiste no confinamento das linhas de campo pela baixa relutância do material (Figura 3.4a), enquanto nas blindagens com materiais condutivos o campo magnético é repelido pelas correntes parasitas induzidas no material (correntes de Foucault – Figura 3.4b).

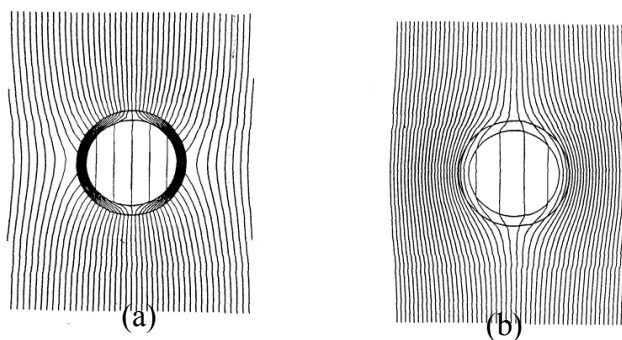


Figura 3.4 – Princípios de blindagens metálicas: (a) material ferromagnético - confinamento das linhas de campo devido à baixa relutância; (b) material condutivo – campo magnético é repelido pelas correntes parasitas induzidas (SALINAS, 2003).

É importante destacar que enquanto o material ferromagnético atua como blindagem em toda a faixa estudada de 0 a 180 Hz, o material condutivo, em função do fenômeno da indução, só começa a apresentar o efeito de blindagem para C.A. (frequência > 0 Hz), não apresentando nenhum efeito de blindagem para campo estático, e este efeito cresce com o aumento da frequência.

3.2.1 BLINDAGEM FERROMAGNÉTICA × BLINDAGEM CONDUTIVA EM SALAS DE RM

A utilização de materiais de alta permeabilidade magnética (blindagem ferromagnética) tem a função de reduzir o campo magnético C.A. externo e conter as linhas de campo estático do magneto. Os materiais de elevada permeabilidade magnética fornecem um caminho de baixa relutância que desvia as linhas de fluxo a partir da região de interesse (KALAFALA, 1993). Atualmente o material ferromagnético mais utilizado comercialmente no Brasil para este tipo de blindagem é o Fe-Si GNO (liga metálica de ferro e silício com grãos não orientados).

Os materiais ferromagnéticos apresentam uma característica intrínseca que é a saturação. Cada material possui uma permeabilidade ao fluxo magnético que é finita e, uma vez atingido este valor, o material perde suas características ferromagnéticas para o fluxo excedente. A maioria dos materiais ferromagnéticos apresenta características de condutividade elétrica bastante pobres em comparação com os materiais “condutivos”, embora uma pequena parte da atenuação eletromagnética das blindagens construídas com metais ferromagnéticos advenha desta característica. Na Tabela 3.1 são apresentadas as vantagens e desvantagens na utilização do Fe-Si GNO em blindagens de salas de equipamentos de IRM.

Blindagens condutivas para equipamentos de IRM podem ser construídas com alumínio ou cobre. Atualmente apenas o alumínio tem sido utilizado em blindagens para RF no Brasil, em substituição às blindagens de cobre, de custo muito elevado. As vantagens e desvantagens na utilização do alumínio em blindagem de salas de equipamentos de IRM são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens na utilização do Fe-Si GNO em blindagens de salas de equipamentos de IRM.

Fe-Si GNO	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo (~US\$ 2.50 / kg); • Contém as linhas de campo magnético estático do magneto; • Eficaz para blindagem de campo magnético C.A. quando próximo à fonte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muito pesado (uma chapa de 0,5 mm de espessura pesa 3,8 kg/m²); • Difícil manuseio (necessita estruturas resistentes para fixação nas paredes); • Se utilizadas chapas de grande espessura, podem interferir na homogeneidade do campo estático do equipamento de IRM; • Não é eficiente para blindagem de RF devido à dificuldade de se obter bom contato elétrico nas junções das placas; • Satura quando exposto a campos magnéticos elevados.

Tabela 3.2 – Vantagens e desvantagens na utilização do alumínio em blindagem de salas de equipamentos de IRM.

Alumínio	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Leve (uma chapa de 0,5 mm de espessura pesa 1,2 kg/m²); • Fácil manuseio para fixação e dobras de acordo com o <i>design</i> da sala; • Eficaz para blindagem de RF atingindo atenuação superior a 100 dB; • Não sofre efeito de saturação em decorrência do elevado campo estático dos magnetos ou mesmo ao elevado campo dinâmico (C.A. 50/60 Hz); • É igualmente eficaz para blindagem próxima e distante da fonte; • É utilizado para blindagens de campo magnético de 50/60 Hz em transformadores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado, (~US\$ 8.00 / kg); • Não serve para contenção das linhas de campo magnético estático (C.C.); • Pouco difundido para construção de blindagens de campo magnético C.A. em salas de equipamentos de IRM.

A blindagem de RF é considerada a blindagem padrão para equipamentos de IRM, portanto possui especificações de atenuação pré-definidas pelos fabricantes do equipamento, geralmente 90 ou 100 dB em determinadas faixas de frequências definidas pelo fabricante. Este poder de atenuação pode ser obtido utilizando chapas com 0,3 mm de espessura de alumínio.

Blindagens para contenção de linhas de campo C.C. ou C.A. são consideradas blindagens extras e geram custos adicionais. Atualmente, montagens utilizam chapas de Fe-Si GNO com espessuras variando de acordo com o projeto, geralmente entre 2 e 10 mm. Nestes casos são construídas duas blindagens uma utilizando metais ferromagnéticos e outra utilizando metais condutivos para a blindagem de RF.

3.2.2 EFICÁCIA DA BLINDAGEM

A atenuação do campo magnético pode ser alcançada através de uma proteção feita com material ferromagnético que combina alta permeabilidade ($\mu \gg 1$), com espessura suficiente para desviar o campo magnético para si, através de um caminho de baixa relutância.

Alternativamente, uma camada fina de material condutivo com baixa permeabilidade também pode oferecer proteção efetiva para os campos magnéticos variantes no tempo, pois um campo magnético alternado induzirá correntes na blindagem. Estas correntes criam um campo magnético alternado de orientação oposta no interior da blindagem. Este efeito aumenta com a frequência, resultando numa blindagem de alta eficácia em altas frequências (BJÖRKLÖF, 1999).

Uma blindagem pode ser especificada em termos da redução de intensidade do campo magnético, em decibéis (dB). A utilização de decibéis permite que a atenuação da blindagem resultante de vários efeitos possa ser calculada através da somatória de efeitos, calculados individualmente, para um ou mais mecanismos de atenuação no mesmo material. A eficácia da blindagem é definida para campos magnético da seguinte forma (OTT, 2009):

$$EB = 20 \log \frac{H_0}{H_1} \quad 3.13$$

onde EB [dB] = eficácia da blindagem; H_0 = intensidade do campo incidente; H_1 = intensidade do campo transmitido que emerge do outro lado da blindagem.

Pode-se aplicar a equação 3.13 para a densidade de fluxo magnético \vec{B} :

$$EB = 20 \log \frac{B_0}{B_1} \quad 3.14$$

onde EB [dB] = eficácia da blindagem; B_0 = densidade de fluxo magnético incidente; B_1 = densidade de fluxo magnético transmitido que emerge do outro lado da blindagem.

A EB total é igual à soma das perdas por absorção (PA), por reflexão (PR) mais um fator de correção (M) para representar múltiplas reflexões em blindagens finas (MIL-HDBK-419 A, 1987). Portanto, a eficácia da blindagem EB [dB] pode ser descrita como:

$$EB = PA + PR + M \quad 3.15$$

A eficácia da blindagem varia com as características do campo a ser atenuado (frequência, natureza, ângulo de incidência e polarização), geometria da blindagem e a posição dentro da blindagem onde o campo é medido.

3.2.2.1 PERDAS POR ABSORÇÃO (PA)

Quando uma onda eletromagnética atravessa um meio que não é um condutor perfeito sua amplitude diminui exponencialmente com a distância. Esse decaimento ocorre porque as correntes induzidas no meio produzem perdas ôhmicas e aquecimento do material. Esse efeito pode ser descrito na equação 3.16.

$$H_1 = H_0 e^{-d/\delta} \quad 3.16$$

onde H_1 é a intensidade do campo a uma distância d dentro do meio. A distância necessária para que a onda seja atenuada é $1/e$ (ou $\sim 37\%$) do seu valor original é definida como a profundidade de penetração δ [m], que é igual a:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad 3.17$$

onde f = frequência [Hz]; μ = permeabilidade, assumido $\mu = \mu_0 \mu_r$; μ_r = permeabilidade do material [H/m]; σ = condutividade do material [$1/\Omega \cdot m$].

As perdas por absorção podem ser calculadas por (OTT, 1988):

$$PA_{dB} = 8,69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad 3.18$$

onde t = espessura da blindagem [m] (OTT, 1988).

3.2.2.2 PERDAS POR REFLEXÃO (PR)

Perdas por reflexão ocorrem quando a impedância de um meio onde o campo se propaga é muito diferente da impedância da blindagem. Na passagem de um meio para o outro há uma redução na transferência de energia do campo na proporção da diferença entre as impedâncias. Nos casos em que as perdas por reflexão são baixas, metais com alta permeabilidade em relação

ao meio e maiores espessuras podem ser utilizados para aumentar a diferença entre as impedâncias e, portanto, a eficácia da blindagem.

A permeabilidade dos materiais ferromagnéticos varia com a frequência do campo, de modo que para campos magnéticos de baixa frequência, a diferença de impedâncias da blindagem e do meio onde o campo se propaga (ar) não é grande, resultando, portanto, em baixas perdas por reflexão. À medida que a frequência aumenta, a perda por reflexão também aumenta, podendo-se dizer que as perdas por reflexão são quase proporcionais à frequência.

As perdas por reflexão para campo magnético podem ser descritas por:

$$PR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{Z_w}{4 Z_s} \right) \quad 3.19$$

onde Z_w = impedância da onda e Z_s = impedância intrínseca do meio.

No campo próximo a uma fonte de dipolo eletromagnético, o campo magnético é dominante e a impedância de onda é de aproximadamente:

$$Z_w = 2\pi f \mu r \quad 3.20$$

onde r é a distância [m] entre a fonte e o ponto de interesse.

Substituindo 3.20 em 3.19 e aplicando o valor da permeabilidade μ no espaço livre, resulta:

$$PR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{1,97 \cdot 10^{-6} f r}{Z_s} \right) \quad 3.21$$

Em geral, para qualquer condutor adota-se a impedância intrínseca do meio (Z_s):

$$Z_s = 3,68 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma}} \sqrt{f} \quad 3.22$$

Substituindo a equação 3.22 em 3.21, e rearranjando tem-se:

$$PR_{dB} = 14,6 + 10 \log_{10} \left(\frac{f r^2 \sigma}{\mu_r} \right) \quad 3.23$$

Esta equação considera a blindagem próxima da fonte do campo, a uma distância $r < \lambda/2\pi$, onde λ = comprimento de onda, que é dado por $\lambda = c/f$ [m], c é a velocidade que uma onda eletromagnética se propaga no vácuo ($c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s). Ao contrário das perdas por absorção

que dependem da espessura da blindagem, as perdas por reflexão dependem da distância entre a fonte de radiação eletromagnética e a blindagem (OTT, 1988; PAUL, 2006).

3.2.2.3 FATOR DE CORREÇÃO DE MÚLTIPLAS REFLEXÕES (M)

Quando as perdas por absorção da blindagem são baixas (< 10 dB), uma fração significativa de energia é refletida na segunda superfície da blindagem e, finalmente, atravessa a blindagem desprotegendo a área a ser blindada. Esta energia refletida é calculada através do fator de correção de múltiplas reflexões (OTT, 2009):

$$M_{dB} = 20 \log |1 - e^{-2t/\delta}| \quad 3.24$$

3.2.3 CÁLCULO DA EFICÁCIA DA BLINDAGEM PARA GEOMETRIAS RETANGULARES

Quando uma blindagem é inserida entre a fonte e a região a ser protegida, a resultante do campo que chega até ela é dependente da geometria da blindagem, parâmetros dos materiais e a frequência do campo emitido (CELOZZI *et al.*, 2008).

Existem diversos métodos de análise da eficácia da blindagem em relação à geometria. Os mais comuns são por aproximação a transmissão de ondas planas e o modelo de circuito equivalente (COOLEY, 1968). A teoria dos circuitos equivalentes pode ser aplicada a estruturas pequenas em relação ao comprimento de onda, como no caso de salas de exames de RM (quando têm suas dimensões comparadas ao comprimento de onda para frequência de 60 Hz que é 5.000 km). Assim, esta abordagem é especialmente útil para blindagens de campo magnético de baixa frequência (COOLEY, 1968; MILLER e BRIDGES, 1968).

Para os cálculos da eficácia da blindagem foi utilizado o modelo descrito por Cooley (1968), que usa uma solução de aproximação quase estática das equações de Maxwell para determinar o campo magnético dentro de compartimentos não uniformes imersos em um campo magnético uniforme. A solução baseia-se na forma integral das equações de Maxwell.

3.2.3.1 BLINDAGEM COM GEOMETRIA RETANGULAR

No modelo descrito por Cooley (1968), uma casca cilíndrica de comprimento infinito imerso em um campo magnético axial é considerada para desenvolvimento do método em geometria uniforme, e em seguida o modelo é estendido para derivar uma fórmula para blindagem com geometria retangular, conforme apresentado na Figura 3.5. Assim, a diferença de campo magnético de dentro para fora é:

$$H_i - H_o = - \int_a^b J_\theta dr \quad 3.25$$

onde o lado direito é a corrente total por unidade de comprimento e H_o e H_i representam o campo magnético no exterior e interior da blindagem, respectivamente.

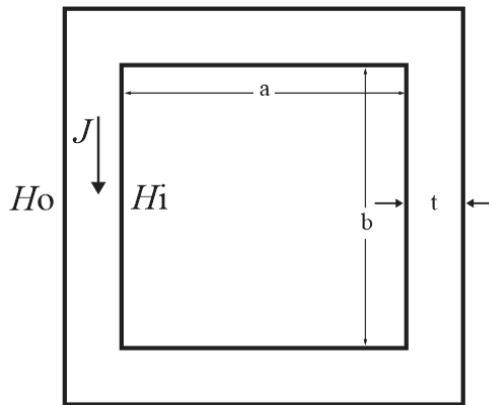


Figura 3.5 – Blindagem com geometria retangular (t é a espessura [m], a e b representam comprimento e largura [m], J é a densidade de corrente, H_i e H_o representam o campo magnético no interior e exterior da blindagem respectivamente) – vista superior (Adaptado de COOLEY, 1968).

Segundo Cooley (1968), a eficácia da blindagem para geometria retangular pode ser calculada através da seguinte aproximação:

$$\frac{H_o}{H_i} = \cosh(\gamma t) + \frac{\gamma ab}{2(a+b)\mu_r} \sinh(\gamma t) \quad 3.26$$

onde γ = constante de propagação [m^{-1}], t é a espessura da blindagem [m], a e b representam comprimento e largura da blindagem [m].

As restrições para este modelo apresentado na equação 3.26 são que todas as dimensões (a , b , t) devem ser menores que o comprimento de onda no espaço livre e que o comprimento da blindagem deve ser $> 2ab/(a+b)$.

A constante de propagação no metal pode ser expressa da seguinte forma:

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad 3.27$$

ou

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\delta} \quad 3.28$$

Hasselgren e Luomi (1995) apresentam uma simplificação seguindo o mesmo princípio proposto por Cooley (1968), onde a partir da equação 3.26 realiza-se uma analogia considerando um coeficiente K :

$$(K + \frac{1}{K}) = \frac{\gamma ab}{(a+b)\mu_r} \quad 3.29$$

Substituindo 3.29 em 3.26, resulta:

$$\frac{H_o}{H_i} = \cosh(\gamma t) + \frac{1}{2}(K + \frac{1}{K}) \sinh(\gamma t) \quad 3.30$$

Se $|K| \ll 1$, $t > \delta$ e $\gamma t \approx 1$, pode-se simplificar a equação 3.30 para uma fórmula magnetostática que depende apenas das dimensões da blindagem (a , b , t) e da permeabilidade relativa do material:

$$\frac{H_o}{H_i} = 1 + \frac{1}{2} \frac{\mu_r t}{r} \quad 3.31$$

onde r = raio [m].

Considerando o caso de um ‘cilindro retangular’ com $r = ab/(a+b)$ em 3.31, tem-se:

$$\frac{H_o}{H_i} = 1 + \frac{1}{2} \frac{(a+b)\mu_r t}{ab} \quad 3.32$$

Enquanto que para materiais condutivos de espessura fina ($t \ll \delta$), tem-se:

$$\frac{H_o}{H_i} = 1 + \frac{1}{2} j \frac{\omega\mu_0\sigma t(ab)}{(a+b)} \quad 3.33$$

A eficácia da blindagem será calculada através da equação 3.32 para materiais ferromagnéticos e pela equação 3.33 para materiais condutivos. Para se obter os resultados da eficácia da blindagem (em dB) deve-se aplicar a equação 3.13 nos resultados obtidos por estas equações.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido em três etapas: a primeira descreve o modelo utilizado para o cálculo analítico da eficácia da blindagem, a segunda consiste nos experimentos em um ambiente controlado buscando obter resultados reais da eficácia da blindagem, e por fim a terceira refere-se à simulação computacional para comparar os resultados obtidos nos cálculos e nos experimentos, para que no futuro novos projetos variando as dimensões geométricas da sala sejam realizados apenas com a simulação, sem a necessidade de fazer toda experimentação novamente.

4.1 CÁLCULO ANALÍTICO

A fim de demonstrar as vantagens na utilização de blindagens condutivas para campo magnético C.A. foram realizados cálculos da eficácia da blindagem (*EB*) utilizando “alumínio liga 1200” como material condutivo e “Fe-Si GNO liga E185” como material ferromagnético, considerando um modelo de geometria retangular.

Foram utilizados o “alumínio liga 1200” e o “Fe-Si GNO liga E185” a fim de se obter resultados mais próximos à realidade, pois estas ligas são comumente utilizadas nas blindagens de salas de equipamento de IRM devido seu custo acessível e disponibilidade no mercado nacional. O “alumínio liga 1200” possui como características-chave alta condutividade térmica, muito boa soldabilidade, muito boa resistência à corrosão atmosférica, facilidade na realização de junções e alta capacidade de anodização (SMITHS METAL, 2017). O aço elétrico de grão não orientado possui excelente valor de permeabilidade, baixas perdas magnéticas e boas propriedades magnéticas em qualquer direção considerada (APERAM, 2017).

Para o desenvolvimento do cálculo analítico foram considerados os valores de condutividade e permeabilidade relativa dos materiais seguindo as suas especificações, conforme apresentado na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 – Condutividade (σ) aproximada do alumínio e Fe-Si GNO, em siemens por metro (S/m) (GOLTZ, 2012; SMITHS METAL, 2017; COGENT POWER, 2017).

Propriedades dos materiais		
Material	Condutividade elétrica [10^6 S/m]	Permeabilidade relativa [H/m] @1,5 T
Alumínio	34,5	1
Fe-Si GNO	2,6	1.600

A equação 3.32 foi utilizada no cálculo da EB para os materiais ferromagnéticos e a equação 3.33 para materiais condutivos. O resultado da EB é apresentado em dB utilizando a equação 3.13. Os resultados destes cálculos são apresentados à frente, no Capítulo 5.

4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional foi realizada com o *software* COMSOL Multiphysics[®], com o módulo adicional AC/DC, de forma a obter ferramentas dedicadas ao objetivo do estudo.

Buscando realizar uma simulação sem grande complexidade na construção experimental e com a finalidade de verificar a eficácia da blindagem de campo magnético de 60 Hz foi desenhado no COMSOL o modelo computacional para uma configuração com cabo condutor por onde passa uma corrente conhecida, e a blindagem como uma caixa metálica cúbica com o sensor em seu interior.

A Figura 4.1 apresenta o circuito utilizado para desenvolvimento do projeto computacional e experimental. Foi utilizado um cabo condutor com formato de uma espira retangular para gerar o campo magnético. Os pontos P1-P5 são os pontos de medição que representam a posição do centro da blindagem (posição do sensor) e varia de 1 a 5 m com intervalos de medidas a cada 1 m.

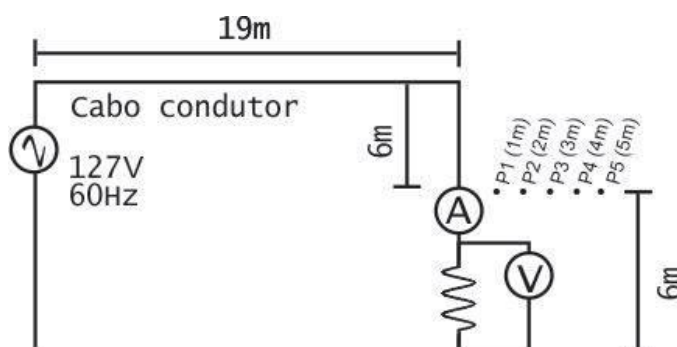


Figura 4.1 – Circuito utilizado para desenvolvimento do projeto computacional e experimental, foi utilizado um cabo condutor em formato de espira retangular para gerar o campo magnético, os pontos P1-P5 são os pontos de medição que representam a posição do centro da blindagem.

Além de ser de construção e modelagem simples, esta configuração também reproduz uma das fontes de interferência de C.A. mais comuns próximas às instalações de equipamentos de RM em centros médicos e hospitais, que são os cabos condutores de potência.

Para a blindagem cúbica foi construída uma estrutura metálica para fixação das chapas de alumínio e/ou Fe-Si GNO, onde se pudesse variar a espessura das chapas. A Figura 4.2 apresenta o projeto utilizado para o desenvolvimento experimental e computacional da estrutura metálica.

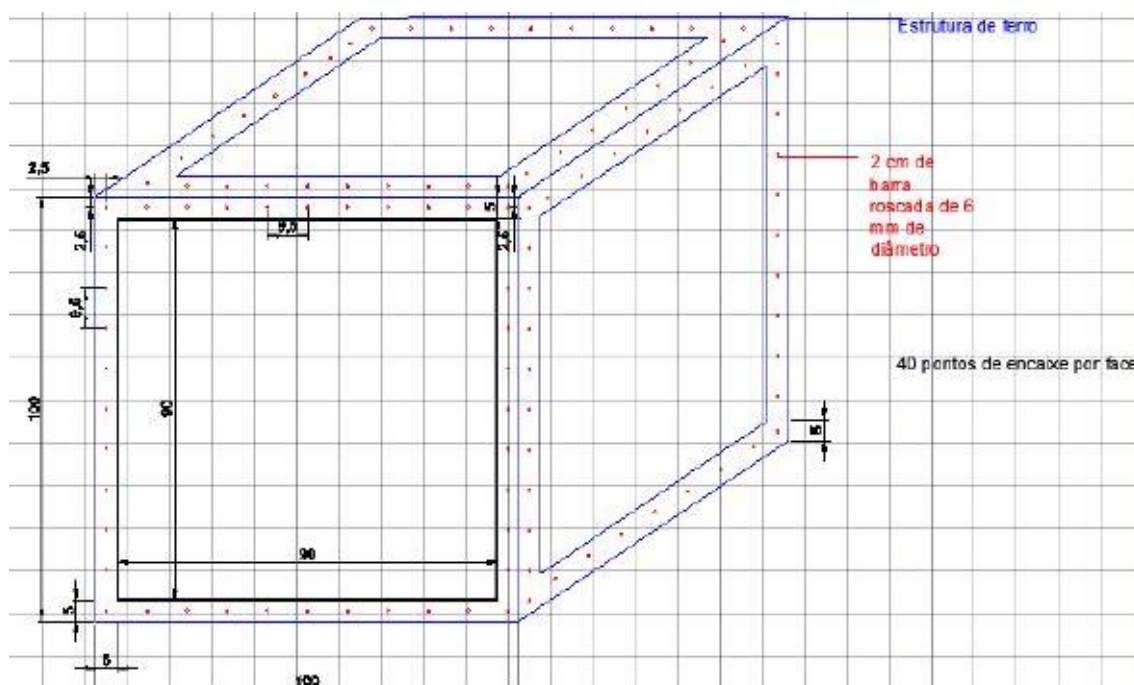


Figura 4.2 – Projeto utilizado para desenvolvimento da estrutura metálica utilizada nos experimentos e na simulação computacional.

4.2.1 COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics® é uma plataforma de *software* multipropósito com base em métodos numéricos avançados para modelar e simular problemas de física, podendo levar em conta fenômenos acoplados ou multifísicos. É possível expandir a sua plataforma de simulação com interfaces físicas dedicadas e ferramentas de aplicações elétricas, mecânicas, de escoamento e químicas, além da possibilidade de conectar as simulações com outras interfaces de modelagem CAD, ECAD, entre outros (COMSOL, 2017).

O módulo AC/DC é usado para simular campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos em aplicações estáticas e de baixa frequência. Internamente, o módulo AC/DC formula e soluciona as equações de Maxwell junto com as propriedades de materiais e as condições de contorno. As equações são resolvidas usando o método dos elementos finitos com discretização numericamente estável nos elementos de borda em conjunto com *solvers* de última geração. As diferentes formulações admitem simulações estáticas, no domínio da frequência e no domínio do tempo. Os resultados são apresentados na janela gráfica por meio de gráficos predefinidos de campos elétricos e magnéticos, correntes e tensões elétricas, ou como expressões que se pode definir à vontade, bem como quantidades derivadas tabeladas (COMSOL, 2017).

4.2.2 Blindagem de campo magnético 60 Hz utilizando uma caixa metálica

Inicialmente foi definida como condição inicial uma dimensão espacial 3D a fim possibilitar a criação da configuração experimental com maior precisão. Também foi definido o estudo no domínio da frequência dentro da interface física de campo magnético.

Após definir os parâmetros acima, a etapa seguinte foi a construção das geometrias a serem estudadas. A partir da Figura 4.2 foi desenhada no *software* a estrutura metálica utilizada para a fixação das chapas metálicas (alumínio ou Fe-Si GNO) (vide item 4.3.1). A Figura 4.3 apresenta um corte de 1/8 do desenho da estrutura metálica, pois a fim de reduzir recursos computacionais e tempo de simulação foram utilizados planos de simetria.

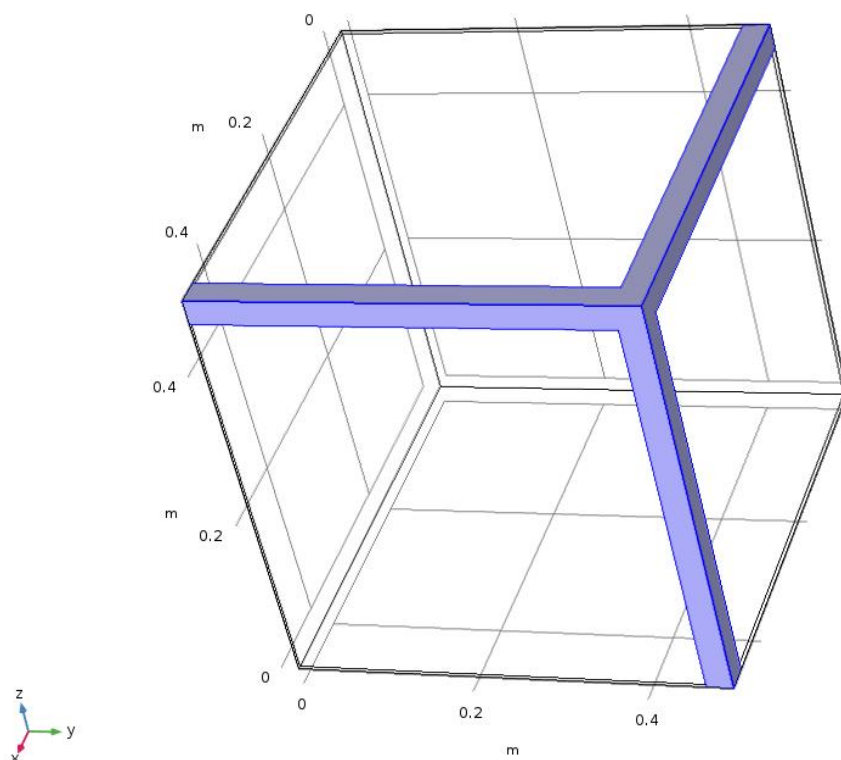


Figura 4.3 – É possível visualizar nesta figura 1/8 da estrutura utilizada para suporte das chapas metálicas (1 dos 8 vértices do cubo), devido à utilização de planos de simetria.

Na Figura 4.4 é apresentado um corte onde é possível visualizar as chapas metálicas sobrepostas à estrutura metálica.

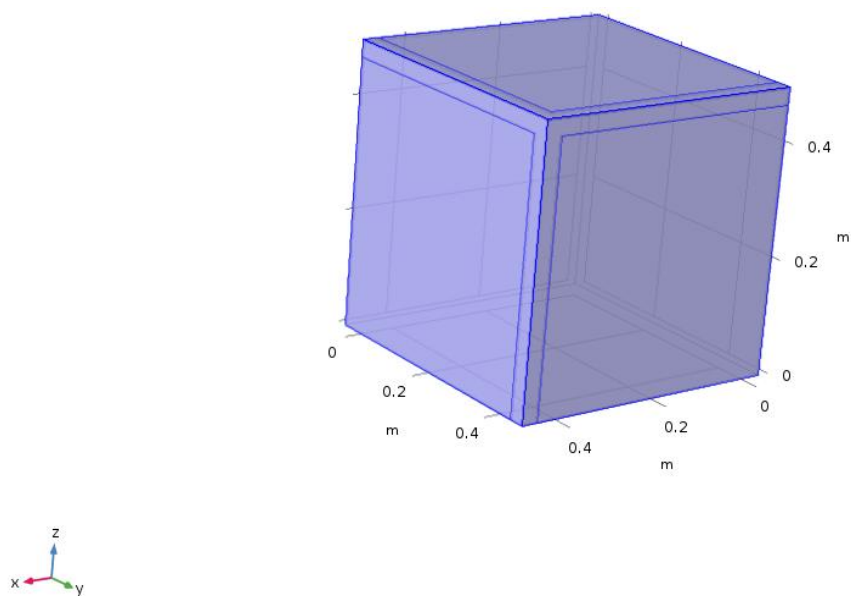


Figura 4.4 - Chapas metálicas sobrepostas a estrutura metálica.

Na Figura 4.5 pode-se visualizar o circuito utilizado no modelo apresentando o cabo condutor e a estrutura da blindagem semelhante à configuração proposta na Figura 4.1.

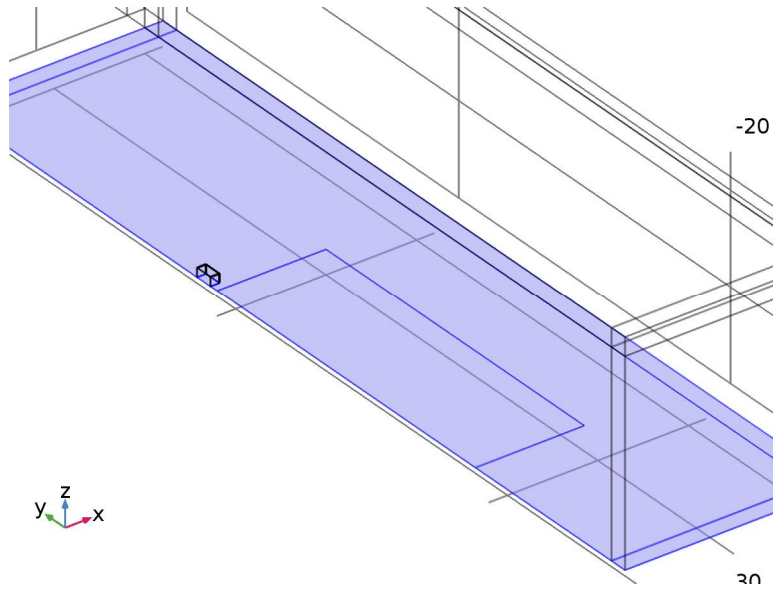


Figura 4.5 – Circuito utilizado no modelo computacional semelhante ao proposto na Figura 4.1.

4.2.3 Gap

Devido à construção da estrutura metálica e à superposição de chapas de dimensões idênticas, com o aumento da espessura da blindagem descontinuidades foram sendo introduzidas nas arestas da blindagem cúbica, com a formação de um *gap* (entreferro) entre as chapas de planos ortogonais, conforme apresentado na Figura 4.6.

Foi então inserido no modelo da simulação um *gap* de 0,5 mm em todas as arestas, como forma de ajustá-lo à construção experimental. Na Figura 4.7 pode-se visualizar o *gap* considerado devido às imperfeições nas junções das chapas metálicas. A Figura 4.8 apresenta uma visão detalhada do *gap*.



Figura 4.6 – Formação de descontinuidades nas arestas da blindagem conforme o aumento da espessura da blindagem *gaps* durante a construção do modelo experimental.

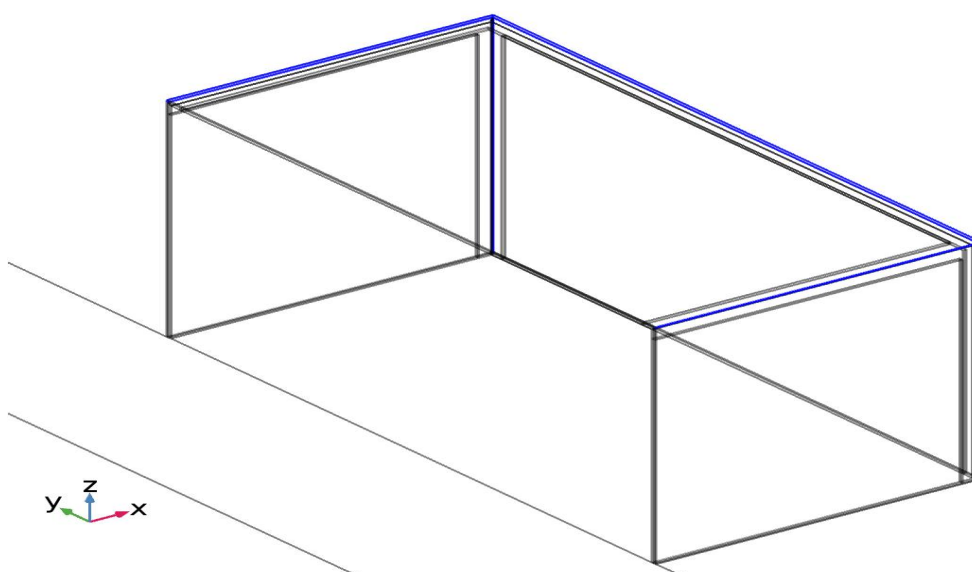


Figura 4.7 - *Gap* representando as imperfeições nas junções das chapas metálicas.

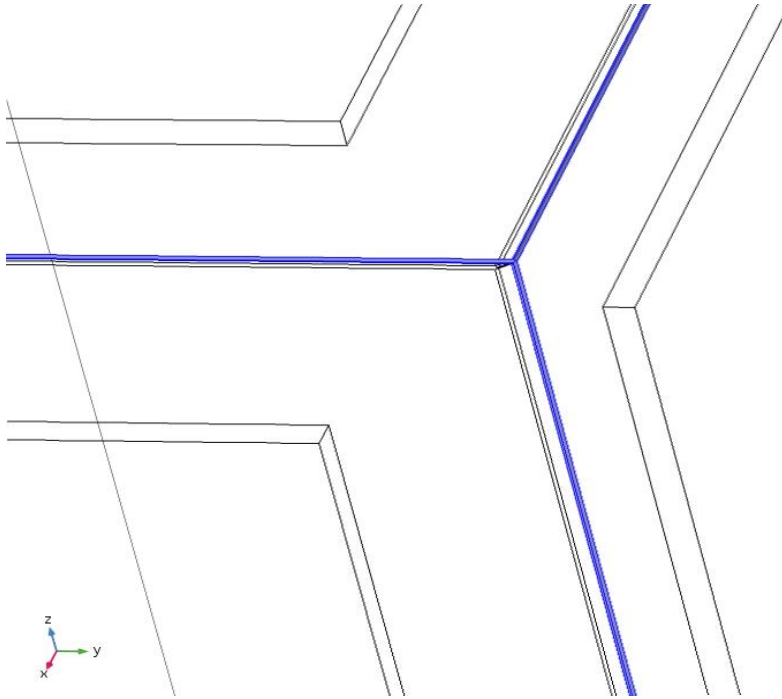


Figura 4.8 – Detalhe do *gap*.

4.2.4 Cálculos e parâmetros aplicados à simulação

Foram utilizados como cálculo básico a lei de Ampère, assumindo as seguintes equações para o domínio da frequência:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad 4.1$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad 4.2$$

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} \quad 4.3$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} + j\omega\vec{D} + \vec{J}_e \quad 4.4$$

O COMSOL Multiphysics[®] utiliza o isolamento magnético como condição de contorno padrão para a interface de campos magnéticos e adiciona uma condição de contorno que define as componentes tangenciais do potencial magnético para zero no limite (COMSOL, 2017):

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0 \quad 4.5$$

Foi aplicada também ao modelo a condição de contorno de um condutor magnético perfeito. Esta condição de contorno é aplicada em superfícies onde se espera que o campo magnético seja totalmente normal às superfícies em questão. Neste caso, o *solver* força a componente tangencial do campo magnético a ser zero nessas superfícies. Tais superfícies não representam condutores magnéticos físicos, mas sim condições físicas que resultam em uma distribuição de campo magnético que satisfaça as condições indicadas (GEDNEY, 2011):

$$\vec{n} \times \vec{H} = 0 \quad 4.6$$

Após desenhar o modelo a ser estudado no COMSOL, é necessário definir os parâmetros das simulações, para que apresentem resultados mais próximos da realidade. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados na simulação.

Descrição	Valor
Frequência f	60 [Hz]
Temperatura T	20 [°C]
Corrente I	52,04 [A _{pp}]
Espessura t	de 0,5 a 5 [mm]
Distância d	de 1 a 5 [m]
Condutividade elétrica σ	Informado na Tabela 4.1
Permeabilidade relativa μ_r	Informado na Tabela 4.1

Foram utilizados como condição de contorno o isolamento magnético e a condição de contorno de um condutor magnético perfeito.

4.3 EXPERIMENTOS

O objetivo dos experimentos foi comparar a eficácia em ambiente laboratorial das blindagens construídas em alumínio e Fe-Si GNO, de forma se obter resultados reais, sem aproximações. Para a construção da blindagem de formato cúbico foi necessário montar uma estrutura metálica como suporte para a fixação das placas metálicas que constituem a blindagem, por meio de parafusos soldados na estrutura, o que possibilitou a variação do número de placas metálicas (e com isso a espessura da blindagem) e do material.

As medições da eficácia da blindagem foram realizadas utilizando um sensor de campo magnético triaxial (magnetômetro) (STL, modelo DM-050), montado sobre um tripé no interior da blindagem cúbica e conectado a um computador via cabo coaxial. As medidas apresentadas representam o módulo dos três eixos.

4.3.1 ESTRUTURA METÁLICA

Para a realização dos experimentos foi confeccionada uma estrutura com cantoneiras de ferro (4 cm de largura, 2 mm de espessura), com dimensões externas de 1,0 m de lado, com 40 parafusos em cada face espaçados por uma distância de 9,5 cm para fixação das chapas metálicas, conforme ilustrado nas Figuras 4.2 acima descrita. Na Figura 4.9 é apresentado um detalhe das faces da estrutura. O conjunto é suportado por 4 rodízios.

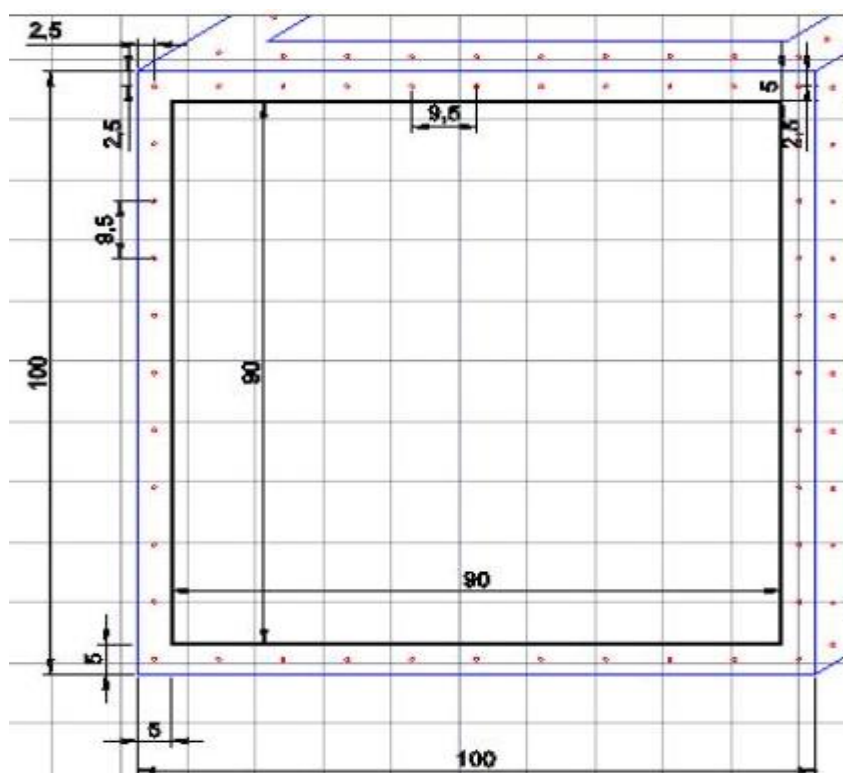


Figura 4.9 – Detalhes das faces da estrutura metálica.

Foram utilizadas 90 chapas metálicas com dimensões de 1,0 m \times 1,0 m, sendo 60 de Fe-Si GNO com espessura 0,5 mm e 30 chapas de alumínio com espessuras de 0,5 e 1,0 mm. Todas

possuíam 40 furos nas laterais para encaixe na estrutura metálica. Além disso, 20 chapas também possuíam um furo no centro para a passagem do cabo do sensor.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam o resultado final da estrutura metálica e a Figura 4.12 apresenta as chapas metálicas montadas na estrutura.



Figura 4.10 – Estrutura metálica com kit de rodízios.



Figura 4.11 – Estrutura metálica com rodízio e uma das placas para teste no fundo.



Figura 4.12 – Chapas metálicas montadas na estrutura.

4.3.2 CIRCUITO GERADOR DE CAMPO MAGNÉTICO

Foi utilizado um circuito com carga resistiva, composto por 2 aquecedores de 1.500 W cada (valores nominais) ligados em paralelo, para gerar uma corrente controlada e, portanto, um campo magnético controlado de 60 Hz conforme apresentado nas Figuras 4.13 e 4.14. Esta configuração possibilitou a leitura do campo magnético gerado por um cabo condutor, facilitando o cálculo teórico e simplificando o modelo experimental.

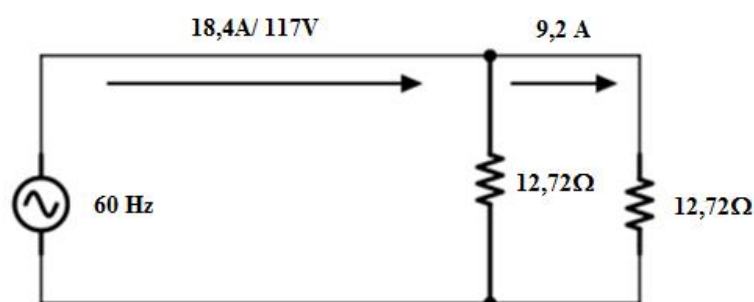


Figura 4.13 - Circuito utilizado para gerar corrente elétrica controlada e campo magnético de 60 Hz.



Figura 4.14 – Aquecedores 1.500 W, 127 V (valores nominais).

O cabo flexível ($\phi 4 \text{ mm}^2$) foi mantido a 60 cm do solo, no mesmo nível do sensor, através de suportes de madeira confeccionados para este fim, conforme apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16. Para fixar o cabo nos suportes e mantê-lo esticado foram utilizadas abraçadeiras.



Figura 4.15 – Suportes de madeira.



Figura 4.16 – Suporte de madeira com cabo flexível.

A distância entre os pontos de medição e o cabo condutor variou de 1 a 5 m com intervalos de medidas a cada 1 m. A fim de reduzir os erros de posicionamento, o piso foi marcado com pontos onde o centro da caixa deveria estar posicionado, conforme apresentado nas Figuras 4.17 e 4.18.



Figura 4.17 – Marcação no piso do posicionamento central do sensor variando a distância de 1 a 5 metros.



Figura 4.18 – Marcação no piso do posicionamento central do sensor variando a distância de 1 a 5 metros.

O sensor de campo magnético foi montado em um tripé, conforme mostrado na Figura 4.19, fixado com fita adesiva dupla face no interior da caixa blindada a fim de assegurar o mesmo posicionamento durante a movimentação da estrutura metálica.



Figura 4.19 – Sensor fixado no interior da estrutura metálica.

4.3.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

A medição do campo magnético no interior da caixa blindada foi realizada pelo magnetômetro triaxial digital conectado a um computador pessoal, conforme as Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

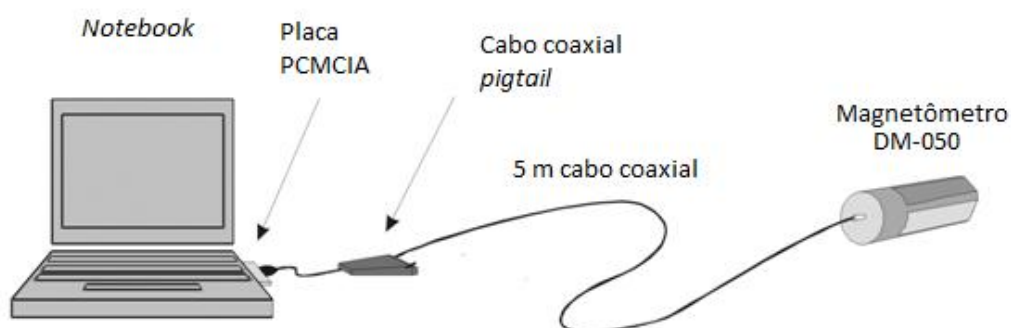


Figura 4.20 – Configuração do sistema de medição de campo magnético (Adaptado de STL-GMBH, 2016).



Figura 4.21 – Configuração do sistema de medição de campo magnético.



Figura 4.22 – Configuração do sistema de medição de campo magnético.

A interface gráfica do *software* Gradmag[®], desenvolvido pela empresa STL para análise de campo magnético, pode ser visualizada na Figura 4.23. O eixo vertical apresenta os resultados de amplitude do campo magnético pico a pico em nanotesla [nT], enquanto o eixo horizontal apresenta o tempo em segundos [s]. O *software* possibilita análise da série temporal ou da transformada de Fourier, e também possibilita analisar cada um dos três eixos separadamente.

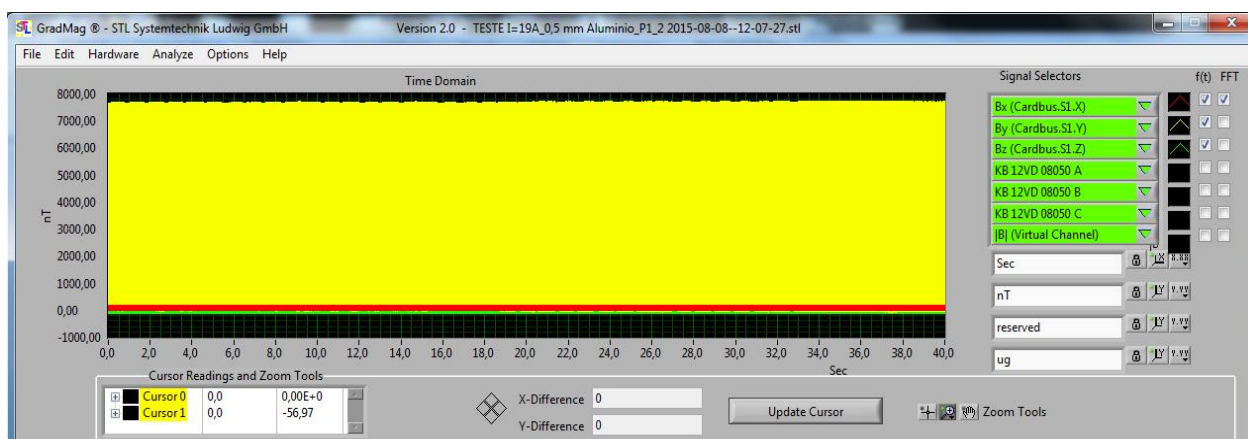


Figura 4.23 – Interface gráfica do *software* Gradmag[®].

4.3.4 PROTOCOLO DE TESTES

Os experimentos consistiram em realizar medições do campo magnético 60 Hz em um ambiente controlado (blindagem cúbica) variando a distância entre o ponto de medição e a fonte geradora (cabo condutor de corrente), a espessura e o material da blindagem.

A fim de minimizar os erros de posicionamento dos elementos de montagem experimental e possibilitar uma análise estatística das medidas, foram realizadas 6 medições em cada ponto com duração de 40 segundos cada.

Inicialmente foram realizadas medições para identificar o campo magnético residual no ambiente, ou seja, sem blindagem, sem estrutura metálica e a fonte de campo magnético desligada (cabo condutor sem corrente). Em seguida, o sensor foi posicionado sobre uma base de madeira dentro da estrutura metálica sem as placas de blindagem para verificar se haveria influência da estrutura metálica nos resultados das medições.

Após esta verificação, a fonte de campo magnético foi energizada (as cargas foram alimentadas), a corrente no cabo condutor foi monitorada, e novas medições foram realizadas no ambiente livre, com a estrutura metálica e sensor posicionado sobre uma base de madeira.

Na segunda etapa dos experimentos, foram acrescentadas à estrutura metálica chapas de alumínio de 0,5 mm em todas as seis faces. Cada novo acréscimo de chapas possibilitou variar a espessura da blindagem de 0,5 mm a 5 mm, com incrementos de 0,5 mm. A mesma série de medições foi então realizada após a remoção das chapas de alumínio e a colocação das chapas de Fe-Si GNO, da mesma forma variando a espessura da blindagem de 0,5 mm a 5 mm, com incrementos de 0,5 mm.

Os experimentos começaram na posição 1,0 m de distância da fonte (cabo condutor) com variações de 1,0 m até chegar a 5,0 m de distância da fonte. Estas variações de distância foram realizadas com a movimentação da estrutura metálica e o magnetômetro, totalizando 3 séries de movimentação, considerando cada série como a movimentação e medição nas posições 1, 2, 3, 4, 5 – 5, 4, 3, 2, 1.

5 RESULTADOS

Os resultados estão organizados seguindo as três etapas descritas na metodologia: cálculo analítico, simulação computacional e experimentos em ambiente aberto.

A fim de padronizar todos os resultados para a densidade de fluxo magnético (\vec{B}), foram utilizados os resultados de amplitude pico a pico, pois é como os resultados são apresentados pelo magnetômetro utilizado. O valor de corrente foi monitorado por meio de um alicate-amperímetro com resultados em A_{rms} , porém para manter a padronização dos resultados para \vec{B} , foi realizada a conversão de A_{rms} para A_{pp} .

5.1 CÁLCULO ANALÍTICO

A densidade de fluxo magnético (\vec{B}) gerado pelo cabo condutor foi calculada através da equação 3.12 na configuração apresentada na Figura 3.2. O raio [m] é a distância entre o centro do cabo condutor e o ponto de medição (centro do magnetômetro), e os resultados de $|\vec{B}|_{pp}$ [nT] são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Densidade de fluxo magnético \vec{B} gerado pela corrente de $52,04A_{pp}$ no cabo condutor.

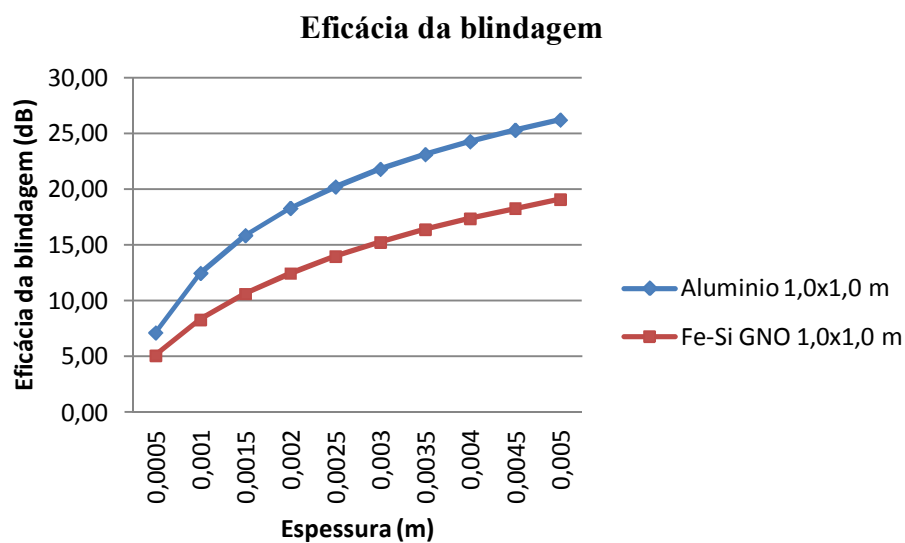
Raio [m]	$ \vec{B} _{pp}$ [nT]
1,0	8.741
2,0	3.682
3,0	2.081
4,0	1.335
5,0	922

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados de EB [dB] obtidos a partir da aplicação do resultado da equações 3.32 e 3.33 aplicados à equação 3.14. Os parâmetros utilizados nos cálculos foram: $f = 60$ Hz, lados do retângulo $a_1 = b_1 = 1,0$ m, e espessura variando de $0,5 \cdot 10^{-3}$ a $5 \cdot 10^{-3}$ m, em incrementos de $0,5 \cdot 10^{-3}$ m.

Tabela 5.2 – Eficácia da blindagem a partir do cálculo analítico.

Eficácia da Blindagem [dB]		
Espessura [mm]	Alumínio	Fe-Si GNO
0,5	7,14	5,11
1,0	12,48	8,30
1,5	15,86	10,63
2,0	18,31	12,46
2,5	20,23	13,98
3,0	21,80	15,27
3,5	23,13	16,39
4,0	24,28	17,38
4,5	25,30	18,28
5,0	26,22	19,08

Na Figura 5.1 são apresentadas as curvas da eficácia da blindagem para o alumínio e o Fe-Si GNO.

**Figura 5.1** - Eficácia da blindagem para frequência de 60 Hz de alumínio e FE-Si GNO.

5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A densidade de fluxo magnético (\vec{B}) gerado pelo cabo condutor foi simulada utilizando o *software* COMSOL Multiphysics[®] aplicando-se a lei de Ampère. Foram realizadas simulações da densidade de fluxo magnético \vec{B} gerada por uma corrente de 52,04 A_{pp} passando pelo cabo condutor. Os resultados são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3– Densidade de fluxo magnético \vec{B} gerado pelo cabo condutor sem estrutura metálica.

Raio [m]	$ \vec{B} _{pp}$ [nT]
1,0	8.814
2,0	3.772
3,0	2.167
4,0	1.416
5,0	997

Os resultados da simulação da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando alumínio são apresentados na Tabela 5.4, enquanto a eficácia da blindagem calculada a partir da equação 3.14 é apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.4 - Densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando alumínio (COMSOL).

Densidade de fluxo magnético $ \vec{B} _{pp}$ [nT]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	4.306	1.801	1.028	670	472
1,0	2.376	971	551	359	253
1,5	1.627	651	368	240	169
2,0	1.214	485	275	180	126
2,5	972	389	220	143	101
3,0	810	322	182	119	83
3,5	703	275	157	102	72
4,0	608	240	136	89	62
4,5	540	215	120	79	55
5,0	486	192	108	71	50

Tabela 5.5 – Eficácia da blindagem utilizando alumínio.

Eficácia da Blindagem [dB]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	6,22	6,42	6,48	6,50	6,50
1,0	11,39	11,79	11,89	11,92	11,91
1,5	14,68	15,26	15,40	15,42	15,42
2,0	17,22	17,82	17,93	17,92	17,97
2,5	19,15	19,73	19,87	19,91	19,89
3,0	20,73	21,37	21,52	21,51	21,59
3,5	21,96	22,74	22,80	22,85	22,83
4,0	23,23	23,93	24,05	24,03	24,13
4,5	24,26	24,88	25,13	25,07	25,17
5,0	25,17	25,87	26,05	26,00	25,99

Da mesma forma, os resultados da simulação da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando Fe-Si GNO são apresentados na Tabela 5.6 enquanto a eficácia da blindagem calculada a partir da equação 3.14 é apresentada na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 - Densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando Fe-Si GNO (COMSOL).

Densidade de fluxo magnético [nT]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	7.270	3.104	1.781	1.162	819
1,0	5.976	2.547	1.461	954	671
1,5	4.877	2.074	1.190	775	546
2,0	3.911	1.665	955	622	439
2,5	3.092	1.316	754	493	346
3,0	2.419	1.030	591	385	271
3,5	1.885	802	459	299	210
4,0	1.462	622	357	233	164
4,5	1.134	483	277	181	127
5,0	881	375	215	140	99

Tabela 5.7 - Eficácia da blindagem utilizando Fe-Si GNO.

Eficácia da Blindagem [dB]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	1,67	1,69	1,70	1,72	1,71
1,0	3,38	3,41	3,42	3,43	3,44
1,5	5,14	5,20	5,21	5,24	5,23
2,0	7,06	7,10	7,12	7,15	7,12
2,5	9,10	9,15	9,17	9,16	9,19
3,0	11,23	11,27	11,29	11,31	11,31
3,5	13,40	13,45	13,48	13,51	13,53
4,0	15,60	15,66	15,66	15,67	15,68
4,5	17,81	17,85	17,87	17,87	17,90
5,0	20,00	20,05	20,07	20,10	20,06

5.3 EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados em 6 baterias de testes. Aplicando-se o Critério de Chauvenet, (método de análise estatística utilizado para eliminação de valores duvidosos) descrito no Apêndice I, apenas 4 séries foram consideradas para a definição do resultado final.

Antes de iniciar as medições da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) gerado pela corrente no cabo condutor, uma série de testes foi realizada a fim de avaliar a densidade de fluxo magnético residual no ambiente de testes sem a estrutura metálica. Estes valores aparecem na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Densidade de fluxo magnético \vec{B} residual sem estrutura metálica.

Raio [m]	$\vec{B} _{pp}$ [nT]
1,0	74 ± 2
2,0	69 ± 1
3,0	72 ± 2
4,0	70 ± 3
5,0	67 ± 2

Em seguida foram realizadas medições buscando avaliar a influência da estrutura metálica nos resultados. Estas medições foram feitas com a estrutura metálica e apenas um fundo de madeira para suporte do magnetômetro. Os resultados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Densidade de fluxo magnético \vec{B} residual com a estrutura metálica.

Raio [m]	$\vec{B} _{pp}$ [nT]
1,0	64 ± 2
2,0	67 ± 1
3,0	62 ± 3
4,0	68 ± 1
5,0	67 ± 1

Na segunda etapa do experimento foram realizadas medições da densidade de fluxo magnético \vec{B} gerada por uma corrente de 52,04 A_{pp} passando pelo cabo condutor sem a estrutura metálica. Os resultados são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - \vec{B} gerado por uma corrente de 52,04 A_{pp}, sem estrutura metálica.

Raio (m)	$\vec{B} _{pp}$ [nT]
1,0	9.033 ± 177
2,0	3.852 ± 64
3,0	2.133 ± 20
4,0	1.364 ± 19
5,0	946 ± 90

Na Tabela 5.11 são apresentados os resultados obtidos para a densidade de fluxo magnético \vec{B} gerada por uma corrente de 52,04 A_{pp} passando pelo cabo condutor com a estrutura metálica.

Tabela 5.11 - \vec{B} gerado por uma corrente de 52,04 A_{pp}, com estrutura metálica.

Raio [m]	$\vec{B} _{pp}$ [nT]
1,0	9.141 ± 49
2,0	3.790 ± 46
3,0	2.106 ± 12
4,0	1.313 ± 10
5,0	919 ± 60

Os resultados das medições da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando alumínio são apresentados na Tabela 5.12, enquanto a eficácia da blindagem calculada a partir da equação 3.14 é apresentada na Tabela 5.13.

Tabela 5.12- Densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando alumínio.

Densidade de fluxo magnético $\vec{B} _{pp}$ [nT]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	7.845 ± 37	3.239 ± 30	1.842 ± 10	1.143 ± 70	800 ± 12
1,0	6.687 ± 26	2.768 ± 20	1.552 ± 12	989 ± 90	700 ± 30
1,5	6.549 ± 70	2.594 ± 10	1.465 ± 80	921 ± 30	655 ± 40
2,0	5.929 ± 60	2.385 ± 10	1.323 ± 13	851 ± 60	599 ± 10
2,5	5.505 ± 62	2.183 ± 28	1.213 ± 30	778 ± 50	551 ± 30
3,0	5.330 ± 45	2.142 ± 24	1.209 ± 11	774 ± 60	533 ± 30
3,5	4.313 ± 32	1.762 ± 90	994 ± 30	642 ± 50	447 ± 20
4,0	4.257 ± 99	1.676 ± 48	943 ± 17	616 ± 70	427 ± 60
4,5	4.079 ± 25	1.648 ± 21	953 ± 18	586 ± 11	414 ± 10
5,0	4.033 ± 37	1.634 ± 40	917 ± 50	580 ± 30	406 ± 40

Tabela 5.13 – Eficácia da blindagem utilizando alumínio.

Eficácia da Blindagem [dB]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	1,33	1,36	1,16	1,20	1,20
1,0	2,72	2,73	2,65	2,46	2,36
1,5	2,90	3,29	3,15	3,08	2,94
2,0	3,76	4,02	4,04	3,77	3,72
2,5	4,40	4,79	4,79	4,55	4,44
3,0	4,69	4,96	4,82	4,59	4,73
3,5	6,52	6,65	6,52	6,21	6,26
4,0	6,64	7,09	6,98	6,57	6,66
4,5	7,01	7,23	6,89	7,01	6,93
5,0	7,11	7,31	7,22	7,10	7,10

A Figura 5.2 apresenta um gráfico da Eficácia da Blindagem de alumínio variando a sua espessura e distância da fonte.

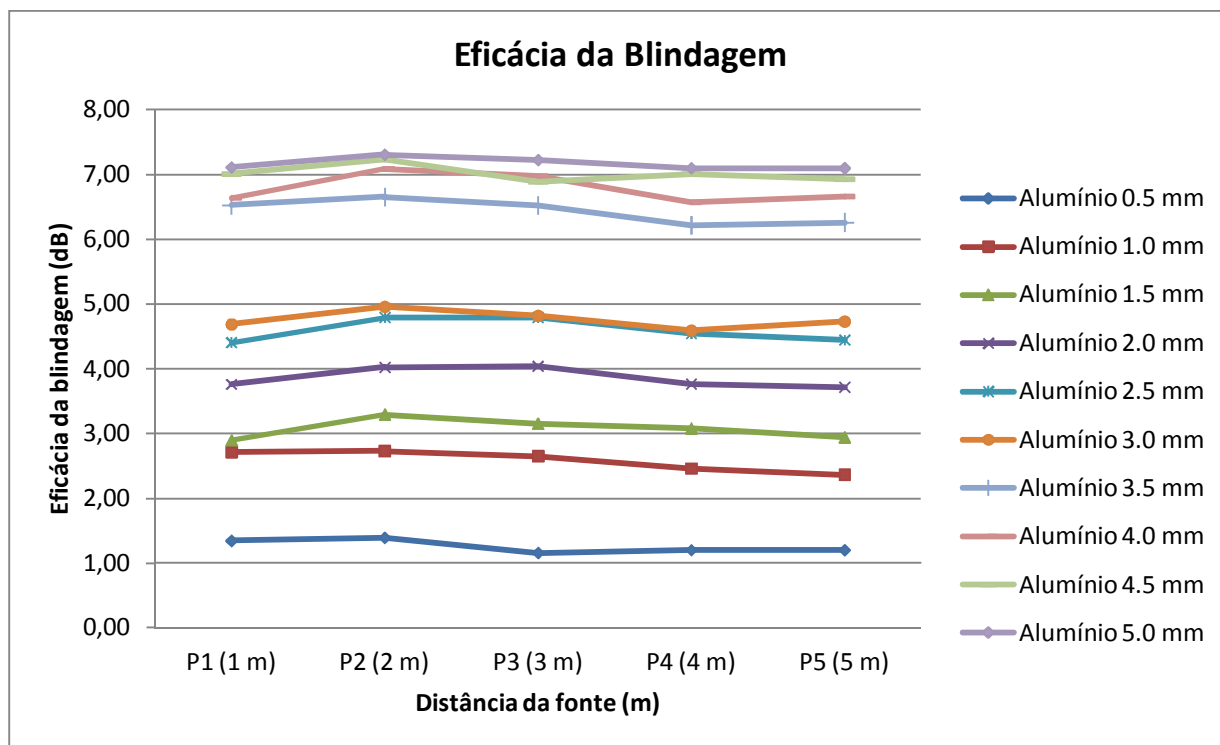


Figura 5.2 – Gráfico da eficácia da blindagem utilizando alumínio.

Da mesma forma, os resultados das medições da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando Fe-Si GNO são apresentados na Tabela 5.14 enquanto a eficácia da blindagem calculada a partir da equação 3.14 é apresentada na Tabela 5.15.

Tabela 5.14 - Densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando Fe-Si GNO.

Densidade de fluxo magnético $ \vec{B} _{pp}$ [nT]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	6.186 ± 32	2.995 ± 12	1.782 ± 50	1.159 ± 40	819 ± 2
1,0	5.689 ± 61	2.715 ± 20	1.597 ± 21	1.014 ± 90	717 ± 2
1,5	5.146 ± 31	2.436 ± 23	1.433 ± 17	937 ± 50	663 ± 5
2,0	4.334 ± 45	2.164 ± 50	1.273 ± 13	829 ± 50	592 ± 1
2,5	3.287 ± 43	1.762 ± 23	1.060 ± 27	689 ± 90	478 ± 2
3,0	2.761 ± 33	1.471 ± 50	893 ± 80	584 ± 50	409 ± 3
3,5	2.490 ± 20	1.329 ± 30	814 ± 60	534 ± 30	379 ± 4
4,0	2.176 ± 11	1.172 ± 40	697 ± 50	457 ± 20	322 ± 1
4,5	2.057 ± 80	1.113 ± 60	654 ± 50	428 ± 20	306 ± 1
5,0	1.706 ± 27	956 ± 60	578 ± 30	377 ± 10	273 ± 2

Tabela 5.15 - Eficácia da Blindagem utilizando Fe-Si GNO.

Eficácia da Blindagem [dB]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	3,39	2,04	1,45	1,08	1,00
1,0	4,12	2,90	2,40	2,24	2,16
1,5	4,99	3,84	3,34	2,93	2,84
2,0	6,48	4,87	4,37	3,99	3,82
2,5	8,88	6,65	5,96	5,60	5,68
3,0	10,40	8,22	7,45	7,04	7,03
3,5	11,30	9,10	8,26	7,81	7,69
4,0	12,47	10,19	9,60	9,17	9,11
4,5	12,96	10,64	10,16	9,74	9,55
5,0	14,58	11,96	11,23	10,84	10,54

A Figura 5.3 apresenta um gráfico da Eficácia da Blindagem de Fe-Si GNO variando a sua espessura e distância da fonte.

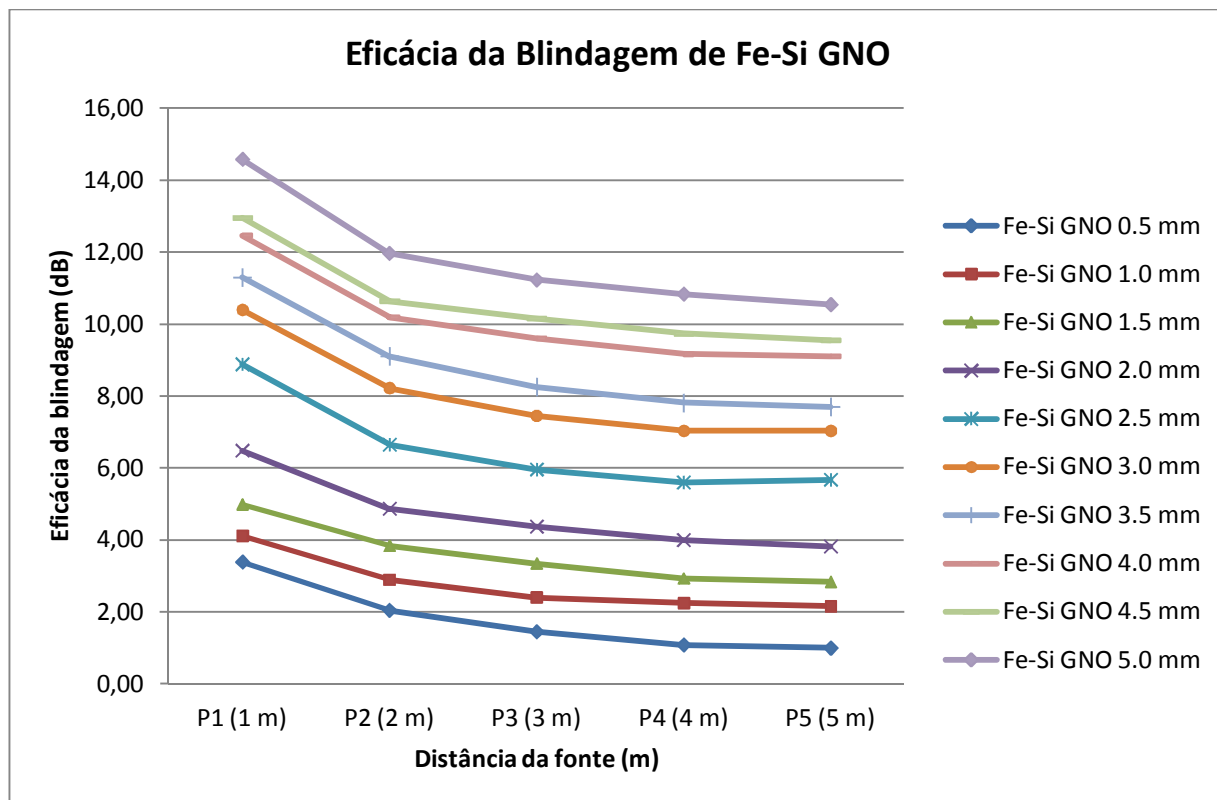


Figura 5.3 - Gráfico da eficácia da blindagem utilizando Fe-Si GNO.

5.4 RESULTADOS COMPARATIVOS

Neste tópico são apresentadas as comparações entre os valores das blindagens condutiva e ferromagnética obtidos no cálculo analítico, experimentos, e a validação do modelo computacional.

A Figura 5.4 apresenta o gráfico comparativo dos valores de densidade de fluxo magnético (\vec{B}) obtidos através do cálculo analítico, experimentação e simulação computacional.

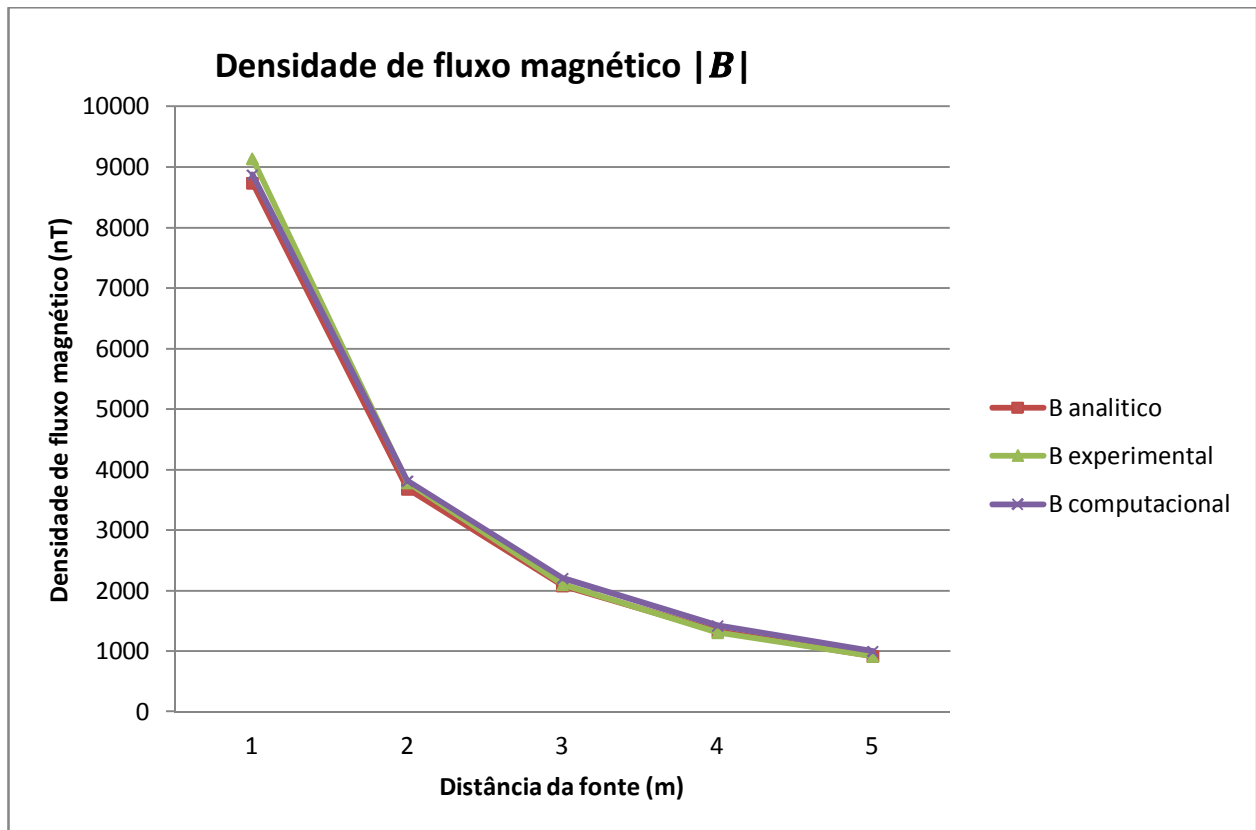


Figura 5.4 – Comparação entre os resultados da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) obtidos a partir do modelo analítico, experimentação e simulação computacional. Valores expressos em $|\vec{B}|_{pp}$ [nT].

A Figura 5.5 apresenta o gráfico comparativo da Eficácia da Blindagem [dB] utilizando alumínio e Fe-Si GNO com espessuras variando de 0,5 a 2,0 mm em incrementos de 0,5 mm, enquanto a Figura 5.6 apresenta o mesmo gráfico da Eficácia da Blindagem [dB] utilizando alumínio e Fe-Si GNO com espessuras variando de 2,5 a 5,0 mm em incrementos de 0,5 mm. Os resultados apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5 foram obtidos a partir dos experimentos e são apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.15 acima.

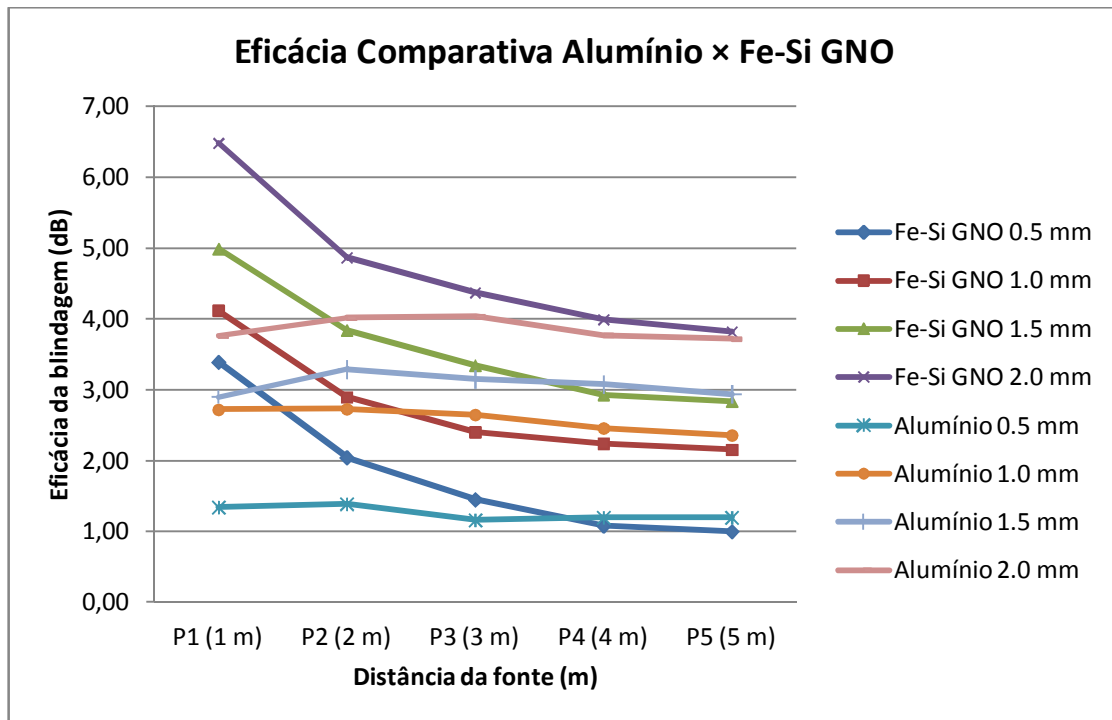


Figura 5.5 - Gráfico comparativo dos experimentos variando a espessura de Alumínio e Fe-Si GNO.

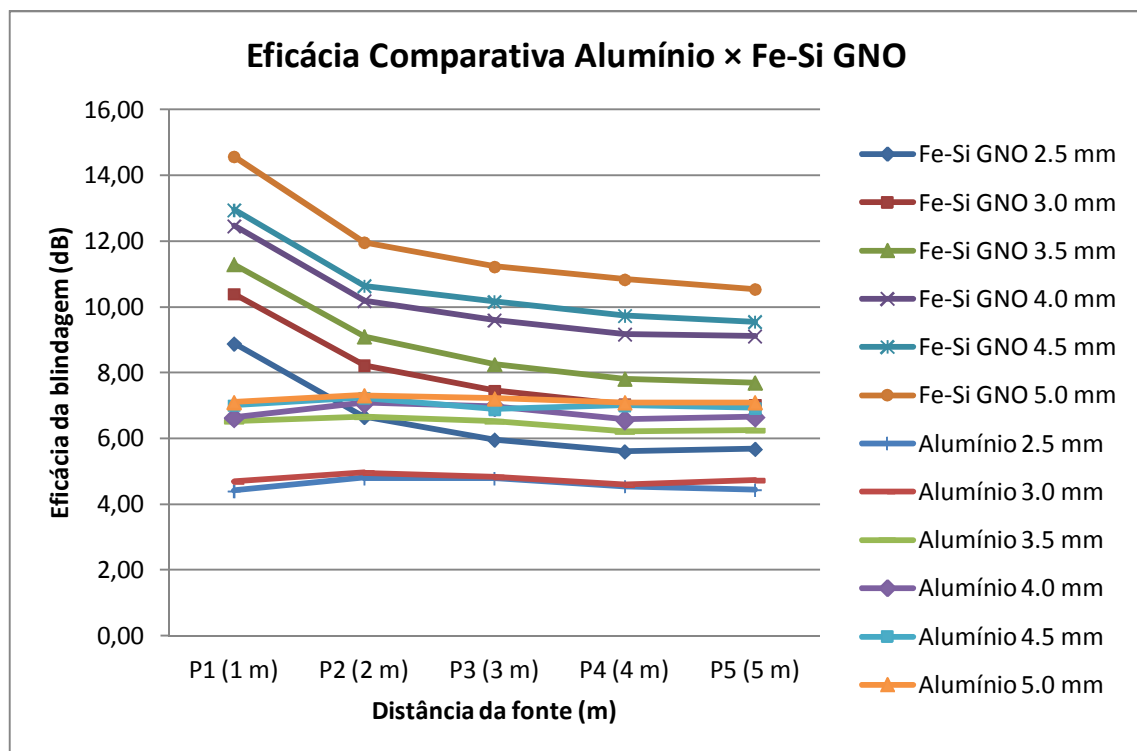


Figura 5.6 - Gráfico comparativo dos experimentos variando a espessura de Alumínio e Fe-Si GNO.

Nas Tabelas 5.16 a 5.20 são apresentados os comparativos da eficácia da blindagem utilizando o Fe-Si GNO entre os experimentos e o modelo computacional.

Tabela 5.16 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 1 (1 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
1,0	0,5	7.270	6.186	-17,52	1.084
	1,0	5.976	5.689	-5,04	287
	1,5	4.877	5.146	5,23	-269
	2,0	3.911	4.334	9,76	-423
	2,5	3.092	3.287	5,93	-195
	3,0	2.419	2.761	12,39	-342
	3,5	1.885	2.490	24,30	-605
	4,0	1.462	2.176	32,81	-714
	4,5	1.134	2.057	44,87	-923
	5,0	881	1.706	48,36	-825

Tabela 5.17 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 2 (2 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
2,0	0,5	3.104	2.995	-3,64	109
	1,0	2.547	2.715	6,19	-168
	1,5	2.074	2.436	14,86	-362
	2,0	1.665	2.164	23,06	-499
	2,5	1.316	1.762	25,31	-446
	3,0	1.030	1.471	29,98	-441
	3,5	802	1.329	39,65	-527
	4,0	622	1.172	46,93	-550
	4,5	483	1.113	56,60	-630
	5,0	375	956	60,77	-581

Tabela 5.18 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 3 (3 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
3,0	0,5	1.781	1.782	0,06	-1
	1,0	1.461	1.597	8,52	-136
	1,5	1.190	1.433	16,96	-243
	2,0	955	1.273	24,98	-318
	2,5	754	1.060	28,87	-306
	3,0	591	893	33,82	-302
	3,5	459	814	43,61	-355
	4,0	357	697	48,78	-340
	4,5	277	654	57,65	-377
	5,0	215	578	62,80	-363

Tabela 5.19 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 4 (4 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
4,0	0,5	1.162	1.159	-0,26	3
	1,0	954	1.014	5,92	-60
	1,5	775	937	17,29	-162
	2,0	622	829	24,97	-207
	2,5	493	689	28,45	-196
	3,0	385	584	34,08	-199
	3,5	299	534	44,01	-235
	4,0	233	457	49,02	-224
	4,5	181	428	57,71	-247
	5,0	140	377	62,86	-237

Tabela 5.20 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 5 (5 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
5,0	0,5	819	819	0,00	0
	1,0	671	717	6,42	-46
	1,5	546	663	17,65	-117
	2,0	439	592	25,84	-153
	2,5	346	478	27,62	-132
	3,0	271	409	33,74	-138
	3,5	210	379	44,59	-169
	4,0	164	322	49,07	-158
	4,5	127	306	58,50	-179
	5,0	99	273	63,74	-174

Nas Tabelas 5.21 a 5.25 são apresentados os comparativos da eficácia da blindagem utilizando o alumínio entre os experimentos e o modelo computacional.

Tabela 5.21 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 1 (1 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
1,0	0,5	4.306	7.845	45,11	-3.539
	1,0	2.376	6.687	64,47	-4.311
	1,5	1.627	6.549	75,16	-4.922
	2,0	1.214	5.929	79,52	-4.715
	2,5	972	5.505	82,34	-4.533
	3,0	810	5.330	84,80	-4.520
	3,5	703	4.313	83,70	-3.610
	4,0	608	4.257	85,72	-3.649
	4,5	540	4.079	86,76	-3.539
	5,0	486	4.033	87,95	-3.547

Tabela 5.22 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 2 (2 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
2,0	0,5	1.801	3.239	44,40	-1.438
	1,0	971	2.768	64,92	-1.797
	1,5	651	2.594	74,90	-1.943
	2,0	485	2.385	79,66	-1.900
	2,5	389	2.183	82,18	-1.794
	3,0	322	2.142	84,97	-1.820
	3,5	275	1.762	84,39	-1.487
	4,0	240	1.676	85,68	-1.436
	4,5	215	1.648	86,95	-1.433
	5,0	192	1.634	88,25	-1.442

Tabela 5.23 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 3 (3 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
3,0	0,5	1.028	1.842	44,19	-814
	1,0	551	1.552	64,50	-1.001
	1,5	368	1.465	74,88	-1.097
	2,0	275	1.323	79,21	-1.048
	2,5	220	1.213	81,86	-993
	3,0	182	1.209	84,95	-1.027
	3,5	157	994	84,21	-837
	4,0	136	943	85,58	-807
	4,5	120	953	87,41	-833
	5,0	108	917	88,22	-809

Tabela 5.24 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 4 (4 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
4,0	0,5	670	1.143	41,38	-473
	1,0	359	989	63,70	-630
	1,5	240	921	73,94	-681
	2,0	180	851	78,85	-671
	2,5	143	778	81,62	-635
	3,0	119	774	84,63	-655
	3,5	102	642	84,11	-540
	4,0	89	616	85,55	-527
	4,5	79	586	86,52	-507
	5,0	71	580	87,76	-509

Tabela 5.25 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional para a posição 5 (5 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $ \vec{B} _{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
5,0	0,5	472	800	41,00	-328
	1,0	253	700	63,86	-447
	1,5	169	655	74,20	-486
	2,0	126	599	78,96	-473
	2,5	101	551	81,67	-450
	3,0	83	533	84,43	-450
	3,5	72	447	83,89	-375
	4,0	62	427	85,48	-365
	4,5	55	414	86,71	-359
	5,0	50	406	87,68	-356

A Figura 5.7 apresenta o gráfico comparativo da Eficácia da Blindagem [dB] utilizando alumínio e Fe-Si GNO obtido a partir do cálculo analítico, experimentação e simulação

computacional, variando a sua espessura. Para a obtenção dos resultados apresentados no gráfico foi considerada a média da EB obtida em todos os pontos de medição na experimentação.

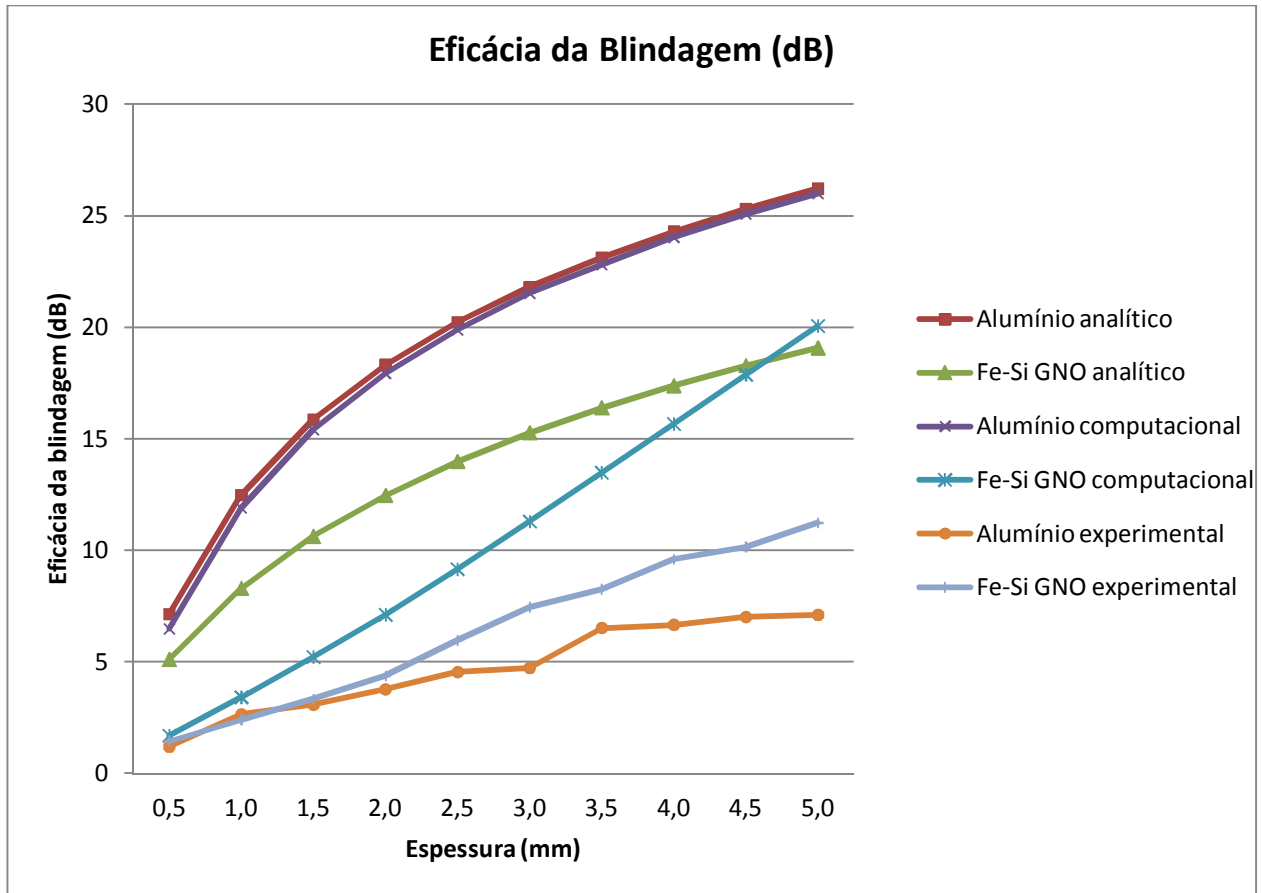


Figura 5.7 - Gráfico comparativo dos resultados de EB obtidos a partir do cálculo analítico, experimentação e simulação computacional, variando o material (Al e Fe-Si GNO) e a espessura da blindagem.

5.5 RESULTADOS OBTIDOS APÓS A INSERÇÃO DE *GAPS* AO MODELO COMPUTACIONAL

Os resultados da simulação da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando alumínio, considerando um *gap* de 0,5 mm, são apresentados na Tabela 5.26, enquanto a eficácia da blindagem calculada a partir da equação 3.14 é apresentada na Tabela 5.27.

Tabela 5.26 - Densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem considerando um *gap* de 0,5 mm utilizando alumínio.

Densidade de fluxo magnético [nT]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	7.736	3.267	1.860	1.218	854
1,0	6.622	2.772	1.569	1.022	720
1,5	5.984	2.474	1.396	917	641
2,0	5.445	2.250	1.281	840	586
2,5	5.082	2.122	1.199	777	552
3,0	4.789	1.980	1.126	740	515
3,5	4.600	1.878	1.079	702	493
4,0	4.334	1.789	1.017	662	467
4,5	4.146	1.730	973	633	446
5,0	3.976	1.641	933	613	426

Tabela 5.27 – Eficácia da blindagem considerando um *gap* de 0,5 mm utilizando alumínio.

Eficácia da Blindagem [dB]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	1,13	1,25	1,33	1,31	1,34
1,0	2,48	2,68	2,80	2,83	2,83
1,5	3,36	3,66	3,82	3,77	3,84
2,0	4,18	4,49	4,57	4,54	4,62
2,5	4,78	5,00	5,14	5,21	5,14
3,0	5,30	5,60	5,69	5,64	5,74
3,5	5,65	6,06	6,06	6,09	6,12
4,0	6,17	6,48	6,57	6,60	6,59
4,5	6,55	6,77	6,95	6,99	6,99
5,0	6,91	7,23	7,32	7,27	7,39

Da mesma forma, os resultados da simulação da densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem utilizando Fe-Si GNO são apresentados na Tabela 5.28 enquanto a eficácia da blindagem calculada a partir da equação 3.14 é apresentada na Tabela 5.29.

Tabela 5.28 - Densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que emerge a partir da blindagem considerando um *gap* de 0,5 mm utilizando Fe-Si GNO.

Densidade de fluxo magnético [nT]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	7.347	3.140	1.803	1.176	829
1,0	6.234	2.664	1.530	998	703
1,5	5.376	2.293	1.317	858	605
2,0	4.667	1.992	1.142	744	525
2,5	4.074	1.734	994	649	456
3,0	3.577	1.520	870	567	400
3,5	3.185	1.346	769	502	353
4,0	2.878	1.214	693	452	318
4,5	2.670	1.124	641	417	293
5,0	2.534	1.062	606	395	278

Tabela 5.29 - Eficácia da blindagem considerando um *gap* de 0,5 mm utilizando Fe-Si GNO.

Eficácia da Blindagem [dB]					
Espessura [mm]	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
0,5	1,58	1,59	1,60	1,61	1,60
1,0	3,01	3,02	3,02	3,04	3,03
1,5	4,29	4,32	4,33	4,35	4,34
2,0	5,52	5,55	5,56	5,59	5,57
2,5	6,70	6,75	6,77	6,78	6,79
3,0	7,83	7,89	7,93	7,95	7,93
3,5	8,84	8,95	9,00	9,01	9,02
4,0	9,72	9,85	9,90	9,92	9,93
4,5	10,37	10,52	10,58	10,62	10,64
5,0	10,83	11,01	11,07	11,09	11,09

5.5.1 RESULTADOS COMPARATIVOS CONSIDERANDO O *GAP*

Neste tópico são apresentadas as comparações entre os valores das blindagens condutiva e ferromagnética obtidos nos experimentos, e a validação do modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem.

Na Figura 5.8 apresenta-se um gráfico comparando os resultados experimentais com os resultados computacionais. As Tabelas 5.30 a 3.34 apresentam um comparativo da eficácia da blindagem utilizando o alumínio entre os experimentos e o modelo computacional.

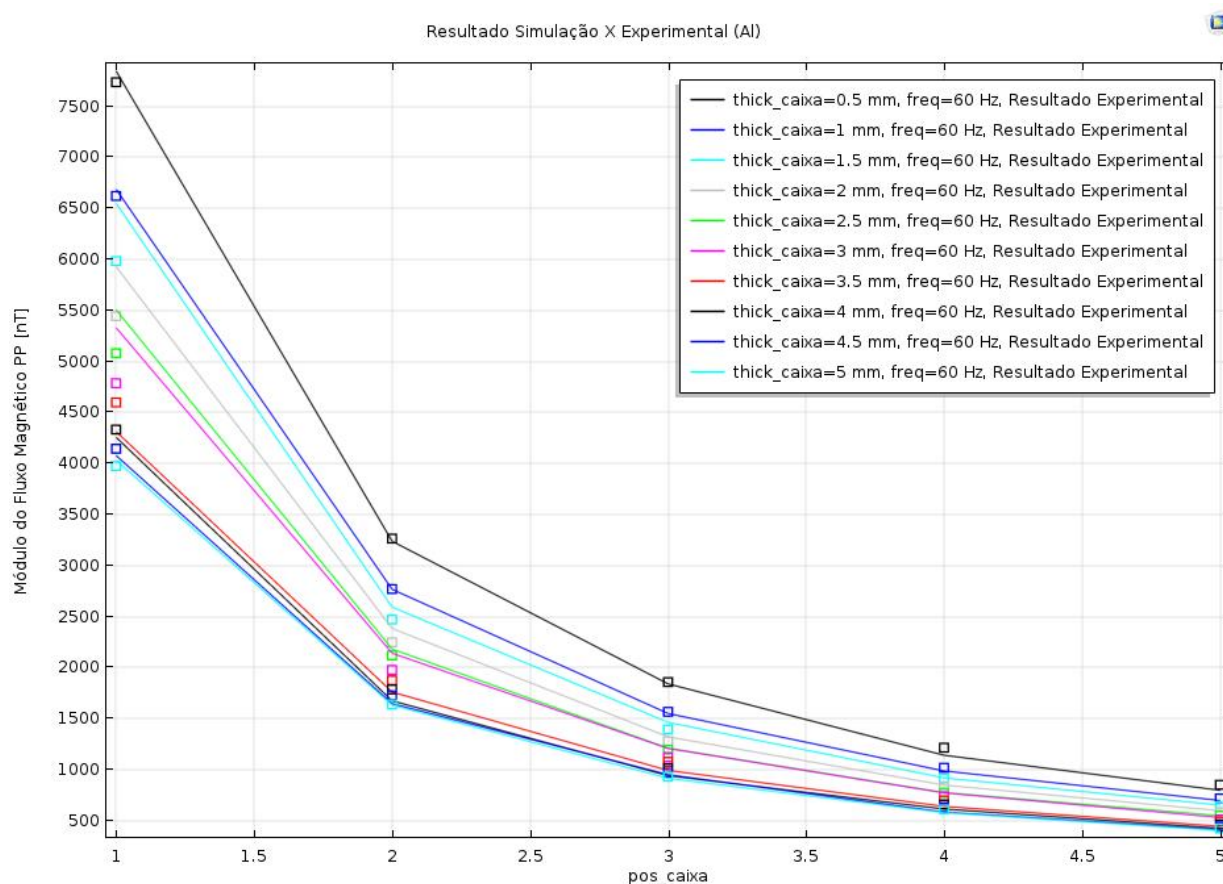


Figura 5.8 – Gráfico comparativo entre os resultados experimentais e computacionais considerando um *gap* de 0,5 mm em todas as arestas da blindagem utilizando alumínio.

Tabela 5.30 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 1 (1 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
1,0	0,5	7.736	7.845	-1,39	-109
	1,0	6.622	6.687	-0,97	-65
	1,5	5.984	6.549	-8,62	-565
	2,0	5.445	5.929	-8,16	-484
	2,5	5.082	5.505	-7,68	-423
	3,0	4.789	5.330	-10,16	-541
	3,5	4.600	4.313	6,64	287
	4,0	4.334	4.257	1,81	77
	4,5	4.146	4.079	1,64	67
	5,0	3.976	4.033	-1,40	-57

Tabela 5.31 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 2 (2 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
2,0	0,5	3.267	3.239	0,86	28
	1,0	2.772	2.768	0,16	4
	1,5	2.474	2.594	-4,62	-120
	2,0	2.250	2.385	-5,64	-135
	2,5	2.122	2.183	-2,81	-61
	3,0	1.980	2.142	-7,58	-162
	3,5	1.878	1.762	6,56	116
	4,0	1.789	1.676	6,76	113
	4,5	1.730	1.648	4,99	82
	5,0	1.641	1.634	0,45	7

Tabela 5.32 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 3 (3 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
3,0	0,5	1.860	1.842	1,00	18
	1,0	1.569	1.552	1,09	17
	1,5	1.396	1.465	-4,69	-69
	2,0	1.281	1.323	-3,18	-42
	2,5	1.199	1.213	-1,20	-14
	3,0	1.126	1.209	-6,89	-83
	3,5	1.079	994	8,52	85
	4,0	1.017	943	7,89	74
	4,5	973	953	2,12	20
	5,0	933	917	1,74	16

Tabela 5.33 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 4 (4 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
4,0	0,5	1.218	1.143	6,54	75
	1,0	1.022	989	3,29	33
	1,5	917	921	-0,42	-4
	2,0	840	851	-1,34	-11
	2,5	777	778	-0,14	-1
	3,0	740	774	-4,43	-34
	3,5	702	642	9,28	60
	4,0	662	616	7,40	46
	4,5	633	586	7,98	47
	5,0	613	580	5,67	33

Tabela 5.34 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 5 (5 m da fonte) para o alumínio.

Posição [m]	Espessura [mm]	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	Alumínio $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
5,0	0,5	854	800	6,75	54
	1,0	720	700	2,91	20
	1,5	641	655	-2,14	-14
	2,0	586	599	-2,15	-13
	2,5	552	551	0,14	1
	3,0	515	533	-3,40	-18
	3,5	493	447	10,29	46
	4,0	467	427	9,31	40
	4,5	446	414	7,75	32
	5,0	426	406	5,04	20

A Figura 5.9 apresenta um gráfico comparando os resultados experimentais com os resultados computacionais. Nas Tabelas 5.35 a 5.39 é apresentado um comparativo da eficácia da blindagem utilizando o Fe-SI GNO entre os experimentos e o modelo computacional.

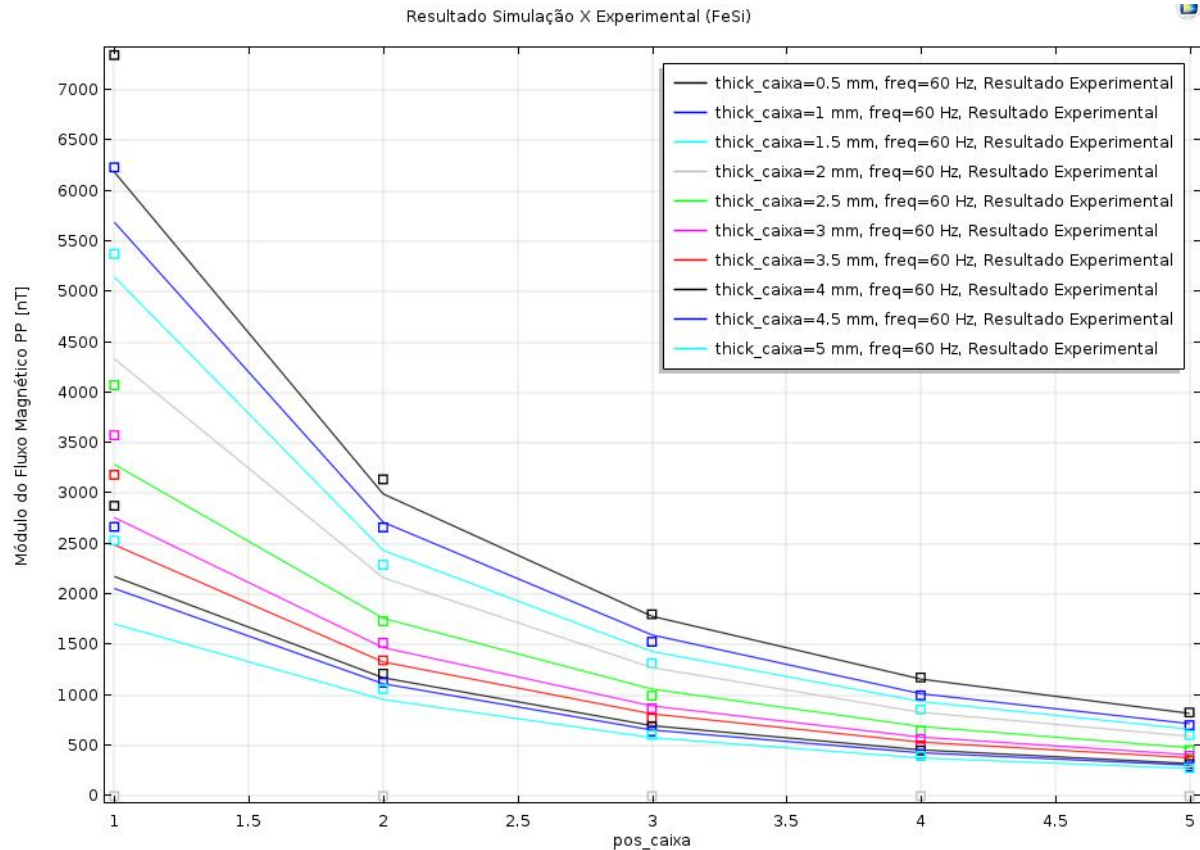


Figura 5.9 – Gráfico comparativo entre os resultados experimentais e computacionais considerando um *gap* de 0,5 mm em todas as arestas da blindagem utilizando Fe-Si GNO.

Tabela 5.35 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 1 (1 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $ B _{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $ B _{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
1,0	0,5	7.347	6.186	18,77	1.161
	1,0	6.234	5.689	9,58	545
	1,5	5.376	5.146	4,48	230
	2,0	4.667	4.334	7,69	333
	2,5	4.074	3.287	23,94	787
	3,0	3.577	2.761	29,55	816
	3,5	3.185	2.490	27,93	695
	4,0	2.878	2.176	32,28	702
	4,5	2.670	2.057	29,79	613
	5,0	2.534	1.706	48,51	828

Tabela 5.36 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 2 (2 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
2,0	0,5	3.140	2.995	4,85	145
	1,0	2.664	2.715	-1,89	-51
	1,5	2.293	2.436	-5,87	-143
	2,0	1.992	2.164	-7,95	-172
	2,5	1.734	1.762	-1,59	-28
	3,0	1.520	1.471	3,35	49
	3,5	1.346	1.329	1,26	17
	4,0	1.214	1.172	3,55	42
	4,5	1.124	1.113	0,95	11
	5,0	1.062	956	11,11	106

Tabela 5.37 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 3 (3 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
3,0	0,5	1.803	1.782	1,16	21
	1,0	1.530	1.597	-4,21	-67
	1,5	1.317	1.433	-8,10	-116
	2,0	1.142	1.273	-10,27	-131
	2,5	994	1.060	-6,23	-66
	3,0	870	893	-2,57	-23
	3,5	769	814	-5,47	-45
	4,0	693	697	-0,53	-4
	4,5	641	654	-2,04	-13
	5,0	606	578	4,85	28

Tabela 5.38 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 4 (4 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
4,0	0,5	1.176	1.159	-1,49	17
	1,0	998	1.014	-1,54	-16
	1,5	858	937	-8,43	-79
	2,0	744	829	-10,21	-85
	2,5	649	689	-5,87	-40
	3,0	567	584	-2,90	-17
	3,5	502	534	-6,04	-32
	4,0	452	457	-1,19	-5
	4,5	417	428	-2,63	-11
	5,0	395	377	4,82	18

Tabela 5.39 - Comparativo entre resultados obtidos nos experimentos e modelo computacional considerando um *gap* de 0,5 mm nas arestas da blindagem para a posição 5 (5 m da fonte) para o Fe-Si GNO.

Posição [m]	Espessura [mm]	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - computacional	FeSi GNO $\overrightarrow{ B }_{pp}$ [nT] - experimental	Erro relativo [%]	Erro absoluto [nT]
5,0	0,5	829	819	1,21	10
	1,0	703	717	-1,99	-14
	1,5	605	663	-8,76	-58
	2,0	525	592	-11,34	-67
	2,5	456	478	-4,61	-22
	3,0	400	409	-2,32	-9
	3,5	353	379	-6,91	-26
	4,0	318	322	-1,21	-4
	4,5	293	306	-4,24	-13
	5,0	278	273	1,69	5

6 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através do cálculo analítico e da simulação computacional apresentados no Capítulo 5 estão em concordância com a literatura (HASSELGREN e LUOMI, 1995; MACHADO, 2012), e demonstram que a blindagem de alumínio é mais eficiente do que a blindagem com material ferromagnético. Ao comparar as Tabelas 5.5 e 5.7, que apresentam os resultados da simulação computacional para o alumínio e Fe-Si GNO, nota-se que a eficácia da blindagem utilizando o alumínio é muito superior quando comparado a *EB* utilizando o Fe-Si GNO. Também se podem comparar os resultados computacionais obtidos nas Tabelas 5.5 e 5.7 com os resultados obtidos através do cálculo analítico apresentados na Tabela 5.2, e nota-se que os resultados são próximos. Pode-se justificar o erro devido a diversas aproximações e simplificações utilizadas no modelo analítico. Entretanto, devido à existência de *gaps* nas arestas de blindagem cúbica não foi possível reproduzir os resultados analíticos e computacionais, onde não foram previstas essas ocorrências.

Mesmo com a influência dos *gaps* os resultados experimentais da *EB* utilizando alumínio e Fe-Si GNO podem ser considerados bons, e a sua aplicabilidade pode ser definida de acordo com alguns parâmetros, como local de instalação do equipamento de IRM, fonte de interferência e distância entre a fonte de interferência e o equipamento.

Na Figura 5.2 pode-se visualizar que a eficácia da blindagem utilizando o alumínio é relativamente constante e independe da distância da fonte, enquanto a *EB* utilizando o Fe-Si GNO decai com o aumento da distância conforme apresentado na Figura 5.3. Em uma abordagem prática, fontes potenciais de campo magnético C.A. estão tipicamente posicionadas a distâncias superiores a 2,5 m do isocentro do equipamento de IRM (posição de maior homogeneidade do campo magnético estático do magneto), portanto para a maioria dos casos pode-se considerar a utilização do alumínio mais vantajosa que a do Fe-Si GNO.

Na Figura 5.4 pode-se observar que para uma distância superior a 3 m a *EB* para ambos os materiais é praticamente a mesma (para espessuras variando de 0,5 mm a 2 mm) e em alguns casos o alumínio apresentou resultados superiores aos do Fe-Si GNO. Porém, observa-se na Figura 5.5 que para espessuras superiores a 2,5 mm a eficácia da blindagem utilizando o Fe-Si é superior à do alumínio nos cinco pontos de medição. Isso significa que a blindagem de alumínio é comparável ou até mais eficaz que a de Fe-Si GNO para distâncias acima de 3 m e espessuras até

2 mm. De acordo com estes resultados a aplicação de uma blindagem de 2 mm de alumínio seria suficiente para viabilizar a instalação de equipamentos de IRM sem riscos de artefatos de imagem na maioria dos projetos críticos devido à alta intensidade de campo magnético C.A. de 60 Hz.

Foi também observado que como a estrutura metálica utilizada para o suporte das chapas metálicas não influenciou os resultados experimentais, essa montagem se mostrou adequada para as medições. No entanto, nas arestas ela introduziu descontinuidade nas chapas com a formação de um *gap* nas placas de Fe-Si GNO e, potencialmente, um isolamento elétrico entre as chapas de alumínio, que não foram considerados nas simulações e podem estar na origem dos erros observados na comparação da *EB* entre experimentos e simulações (Tabelas 5.17 a 5.26).

Além disso, nas simulações computacionais considerou-se que o campo magnético utilizado nos experimentos não possuía intensidade suficiente para saturar as chapas de Fe-Si GNO e, portanto, foram desconsideradas a não linearidade do Fe-Si GNO e a sua curva *BH*. Observando as Tabelas 5.17 a 5.21 nota-se que o erro entre a simulação e os experimentos aumenta com o aumento da espessura e da distância entre o ponto de medição e o centro do cabo condutor quando é utilizado o Fe-Si GNO, produzindo erro máximo de 63,74%. Já observando as Tabelas 5.22 a 5.26, que apresentam os resultados para blindagem de alumínio, nota-se que este mesmo erro aumenta conforme o aumento da espessura da blindagem, produzindo erro máximo de 88,25%.

Devido ao erro relativo estar muito acima do esperado foi necessário realizar um refinamento no modelo computacional, e após serem inseridos os *gaps* no modelo computacional os resultados foram semelhantes aos obtidos nos experimentos. Esta redução nos erros é uma observação importante e abre a possibilidade do raciocínio recíproco: os resultados das primeiras simulações computacionais seriam próximos dos resultados experimentais caso a blindagem construída não apresentassem descontinuidades nas arestas, como deve ser o caso nas blindagens reais. Essa observação pode corroborar nossa expectativa de que no futuro novos projetos variando as dimensões geométricas da sala sejam realizados apenas com a simulação, sem a necessidade de fazer toda experimentação.

Observando as Tabelas 5.30 a 5.39 nota-se que os maiores erros ocorrem quando é utilizado o Fe-Si GNO na posição 1, produzindo erro máximo de 48,51% para espessura de 5 mm. Uma justificativa para este erro poderia ser que apenas na posição 1, onde a blindagem está mais próxima ao cabo condutor e consequentemente mais exposta à alta intensidade de

campo magnético, este poderia estar saturando as chapas de forma a reduzir a permeabilidade magnética e sua EB .

Outra hipótese seria que os valores de condutividade e permeabilidade relativa reais dos materiais utilizados na experimentação sejam diferentes dos considerados no modelo computacional. Não foram realizados estudos laboratoriais para verificação da condutividade e permeabilidade dos materiais utilizados nos experimentos. Para as demais comparações entre os resultados experimentais e computacionais o maior erro foi de 11%, o que pode ser considerado aceitável.

Deve ser considerado que a fase de experimentação teve duração aproximada de 3 meses onde ocorreram variações de temperatura, umidade relativa do ar, possíveis alterações não intencionais no posicionamento do cabo condutor e da caixa blindada que não foram consideradas nas simulações.

Os resultados computacionais podem ser considerados válidos devido ao baixo erro em relação aos valores experimentais e podem ser aplicados em casos reais como orientativos, mas não devem ser aplicados a quaisquer problemas reais, pois cada local possui geometria de sala, posição e tipo de fonte diferente do que foi considerado neste estudo. Para aplicação de blindagem de campo magnético de 60 Hz para equipamentos de IRM, devido ao equipamento possuir uma blindagem ativa em seu sistema, são raros os locais onde se faz necessária uma blindagem com atenuação superior a 50%, ou seja 6 dB, com isso se poderia restringir a utilização “máxima” nos projetos para espessuras de até 3 mm de Fe-Si GNO e 3,5 mm de alumínio.

Considerando que uma sala de exames de RM possui dimensões mínimas para equipamentos supercondutivos (2,4 m altura \times 3,5 m largura \times 5,4 m comprimento) e aproximadamente 2,4 m altura \times 3,5 m largura \times 4,5 m comprimento para equipamentos de imã permanente, pode-se considerar que potenciais fontes de interferências como transformadores, linhas de transmissão, cabos de potência e equipamentos de ar condicionado comumente encontrados em centros médicos estariam a distâncias superiores a 3 m do isocentro do magneto, apresentando vantagem na utilização do alumínio devido à constância na sua EB quando comparada ao Fe-Si GNO.

Pode-se abrir uma exceção para cabos de potência de baixa corrente, uma vez que estes podem ser encontrados próximos ($\sim 1,5$ m) do isocentro do magneto, pois as dimensões da sala e o tamanho do equipamento não permitem instalações mais próximas, porém quando estes cabos são encontrados durante o *site planning* ou *site survey* é solicitado ao cliente que os desvie para a

maior distância possível, deixando toda a área abaixo do magneto totalmente livre de possíveis fontes de interferência.

Conforme já mencionado no Capítulo 1, no Brasil todas as instalações de blindagem de RF para equipamentos de IRM utilizam alumínio, independente da necessidade de contenção das linhas de campo magnético estático nas 6 faces da sala. Portanto, pode-se considerar que para projetos onde a necessidade de blindagem para campo magnético estático é inferior a 4 paredes (salas de tamanho médio ou grande) a utilização do alumínio produz melhor relação custo / benefício do que a utilização do Fe-Si GNO.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é a dificuldade de instalação de blindagem com materiais ferromagnéticos, pois estes necessitam de paredes de alvenaria para fixação das chapas devido à sua atração pelo forte campo magnético do equipamento de IRM, e caso não estejam bem fixadas, geram pequenas vibrações mecânicas que também podem ocasionar artefatos de imagem. A utilização de materiais ferromagnéticos em salas de exames de IRM distorce as linhas de campo magnético estático do equipamento dificultando a homogeneização do campo durante o *startup*. Além disso, em médio / longo prazos as placas enferrujam devido à diferença de temperatura dentro da sala de exames e na parede de alvenaria, que ocasiona a condensação de umidade.

A instalação de uma blindagem de alumínio é mais rápida e simples, pois não depende de alvenaria e pode ser construída de forma modular ou autoportante independente da espessura, por ser um material leve e fácil de dobrar. Não afeta a homogeneidade do campo magnético estático do magneto e é imune à umidade.

Por fim, retomando a discussão do possível efeito da descontinuidade entre as chapas da blindagem (*gap*) na redução da *EB*, já comentado acima, há que se considerar que nos casos de blindagens reais os *gaps* também ocorrem devido à dificuldade prática na instalação, quando nem sempre o fornecedor da blindagem fecha as junções entre as chapas de Fe-Si GNO corretamente. Já realizar junções utilizando o alumínio é mais fácil por este material ser mais flexível quando comparado ao Fe-Si GNO, o que resulta em blindagens com comportamento eletromagnético mais próximo das simulações.

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

Assim como as simulações e os modelos computacionais fazem determinadas simplificações ou omitem alguns aspectos da realidade, também os resultados experimentais devem ser tomados com precaução, uma vez que não há experimentação ou medição que seja isenta de erros. A tarefa de comparar resultados de simulações com experimentação pode tornar difícil identificar a origem das diferenças de resultados.

Em função da simplicidade conceitual dos experimentos realizados, do número de repetições e do baixo desvio padrão encontrado nos resultados experimentais, pode-se considerá-los bem próximos da realidade. Conforme se pode observar nas Tabelas 5.30 a 5.39, os resultados do modelo computacional estão dentro dos limites aceitáveis e podem ser considerados como reais, dependendo da aplicação.

Devido à necessidade de conhecimento avançado e à dificuldade para desenvolver um modelo computacional, os próximos trabalhos terão como foco otimizar este modelo computacional considerando a laminação das chapas, avaliar outras geometrias e a outras fontes de campo magnético.

O fator motivador para continuação deste projeto é que existem diversas aplicações, como blindagens para barramentos, cabos de potência e transformadores onde o foco seria a blindagem da fonte ao invés da vítima, além da aplicação proposta neste estudo e otimizações de blindagem que podem ser realizadas.

7 CONCLUSÕES

A proposta deste estudo foi apresentar as vantagens da utilização do alumínio para blindagem de campo magnético de 60 Hz em sala de exames de imagem por ressonância magnética. Os resultados obtidos através dos experimentos e simulações se mostraram satisfatórios, de forma a comprovar que a utilização do alumínio pode ser vantajosa quando comparado à utilização do Fe-Si GNO em determinados casos. A utilização do alumínio tende a ser promissora devido à facilidade de instalação, manuseio, conservação e em alguns casos melhor relação custo / benefício.

Comprovou-se que a eficácia da blindagem de alumínio possui uma relativa linearidade em relação à distância da fonte, enquanto na utilização de Fe-Si GNO a eficácia decai com o aumento da distância. Pode-se concluir que para distâncias próximas ($< \sim 3$ m) a blindagem utilizando Fe-Si GNO é mais eficaz, ao passo que para distâncias maiores o alumínio pode ser considerado. Para espessuras de 0,5 a 2 mm e distâncias superiores a 3 m a blindagem de alumínio é mais eficaz quando considerado os *gaps* nas arestas.

REFERÊNCIAS

AAPM – American Association of Physicists in Medicine. **Site planning for magnetic resonance imaging systems**. AAPM report n. 20, 1986.

APERAM. **Aços Elétricos de Grão Orientado e de Grão Não-Orientado**. Disponível em: <<https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/08/A%C3%A7os-El%C3%A9tricos-GO-e-GNO.pdf>>. Acesso em 17 set. 2017.

BANERJEE, G.K. **Electrical and Electronic Measurements**. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2nd edition, 2016. ISBN 9788120352467.

BJÖRKLÖF, D. Shielding for EMC. **1999 Compliance Engineering Annual Reference Guide**, p. 137-144, 1999.

CELOZZI, S.; ARANEO, R.; LOVAT, G. **Electromagnetic Shielding**. Wiley-IEEE Press, 2008. ISBN 9780470055366.

CHENG, D.K. **Field and Wave Electromagnetics**, Addison-Wesley, 2008, ISBN 9787302152125.

COGENT POWER. **Typical data for SURA® M470-50A**. Disponível em: <<https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m470-50a.pdf>>. Acesso em 03 set. 2017.

COMSOL. **COMSOL Multiphysics®**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/products>>. Acesso em 13 mar. 2017.

CONTROLLEDPWR. **MRI suite shielding requirements**. Suite LITE, n. 2, 2009. Disponível em: <http://www.controlledpwr.com/whitepapers/mri_room_shielding.pdf>. Acesso em: 12 out. 2013.

COOLEY, W.W. Low-frequency shielding effectiveness of nonuniform enclosures. **IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility**, v. EMC-10, n. 1, p.34-43, 1968.

EDMINISTER, J.A. **Teoria e Problemas de Eletromagnetismo**. Bookman, 2ª edição, 2006. ISBN 8536307137

GE. **SIGNA™ Architect, Discovery* MR750w Pre-installation Manual**. Disponível em: <http://www3.gehealthcare.com/en/support/site_planning>. Acesso em: 04 mar. 2018.

GEDNEY, S.D. **Introduction to the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Electromagnetics**. Morgan & Claypool Publishers, 1st edition, 2011, ISBN 9781608455225.

GOLTZ, E.C. **Estudo de máquina elétrica de fluxo axial aplicada a sistema de tração automotiva com acoplamento direto e frenagem regenerativa**. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFRGS. Porto Alegre, RS, 2012.

HASSELGREN, L.; LUOMI, J. Geometrical aspects of magnetic shielding at extremely low frequencies. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 37, n. 3, p. 409-420, 1995.

HONGTAO, G; SHUNHUA, L; YUPING, D; JI, C. Cement based electromagnetic shielding and absorbing materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, n. 5, p. 468-474, 2006.

ISHIYAMA, A.; HIROOKA, H. Magnetic shielding for MRI superconducting magnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 27, n. 2, p. 1692-1695, 1991.

KALAFALA, A.K. Optimized configurations for passively shielded magnetic resonance imaging magnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 29, n. 2, p. 1240-1244, 1993.

KELLOGG, J. **Electromagnetic interference (EMI) and structural vibration effects on MRI site construction and installation requirements**, 2008. Disponível em: <http://www.ets-lindgren.com/pdf/ETSL_0508_kellogg.pdf>. Acesso em: 10 out. 2013.

NOGUCHI, S.; ISHIYAMA, A. Optimal design method for MRI superconducting magnets with ferromagnetic shield. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 33, n. 2, p. 1904-1907, 1997.

MACHADO, V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 48, n. 2, p. 707-710, 2012.

MIL-HDBK-419 A. **Military Handbook – Grounding, bonding and shielding for electronics equipments and facilities**. US Government Printing Office, Washington, DC, 29 Dec. 1987.

MILLER, D.A.; BRIDGES, J.E. Review of circuit approach to calculate shielding effectiveness. **IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility**, v. EMC-10, n. 1, p. 52-62, 1968.

OTT, H.W. **Noise Reduction Techniques in Electronic Systems**. John Wiley e Sons, 2nd edition, 1988. ISBN 0471850683.

_____. **Electromagnetic Compatibility Engineering**. Wiley, 1st edition, 2009. ISBN 9780470189306.

PAUL, C.R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. Wiley-Interscience, 2nd edition, 2006. ISBN 9780471755005.

REDDY, T.A. **Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists**. Springer, 2011. ISBN 9781441996121.

SALINAS, E. Field mitigation from secondary substation. **CIREN 2003 Round Table on Magnetic Field Mitigation Techniques**, p. 14-19, 2003.

SCHWALL, R.E. MRI-Superconductivity in the marketplace, **IEEE Transactions on Magnetics**, v. MAG-23, n. 2, p. 1287-1293, 1987.

SMITHS METAL, **Datasheet 1200 Aluminium**. Disponível em: <<https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/1xxx/1200.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2017.

SPIEGEL, M.R.; STEPHENS, L.J. **Estatística (Coleção Schaum)**. Bookman. 4th edition. 2009. ISBN 9788577804610.

STL-GMBH, **STL Digital Magnetometer System**. Disponível em: <<http://www.stl-gmbh.de/mediaup/download/DM050-010-005.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2016.

THE JOINT COMMISSION. **Preventing accidents and injuries in the MRI suite**. 2008. Disponível em: <http://www.jointcommission.org/assets/1/18/SEA_38.PDF>. Acesso em: 03 nov. 2013.

YICHAO, Z.; CHENG, G.; LIHUA, S.; BIHUA, Z. Analysis and test of EM shielding for low-frequency magnetic field. **2007 International Symposium on electromagnetic compatibility**, Qingdao, China, p. 345-349, 2007.

YOSHIZAWA, K.; NOGUCHI, S.; IGARASHI, H. Influence of magnetic property of ferromagnetic shield on high field magnet analysis. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 21, n. 3, p. 2088-2091, 2011.

ZUCCA, M.; CHIAMPI, M.; GOZZELINO, L.; ZILBERTI, L. Local magnetic shielding of MRI devices by superconductive materials. **IEEE Transactions on magnetics**, v. 47, n. 10, p. 4278-4281, 2011.

APÊNDICE I

APÊNDICE I

Este apêndice apresenta o Critério de Chauvenet (método estatístico) e as equações dos cálculos estatísticos aplicadas aos resultados experimentais apresentados no item 5.3 que, por questão de praticidade, foram omitidas do texto principal.

CRITÉRIO DE CHAUVENET

Este critério pressupõe que os erros normalmente são distribuídos e têm variação constante. Suponha que um grande número de medições (n) sejam feitas e os resultados seguem uma distribuição Gaussiana. A partir desta distribuição, podemos calcular a probabilidade de que os dados fornecidos derivarão da média por uma determinada quantidade. O critério de Chauvenet afirma que um dado pode ser rejeitado se a probabilidade de que ele se desvie da média seja inferior a $1/2n$.

O critério de Chauvenet para eliminação de valores duvidosos é aplicado de forma simples. Primeiramente determina-se o valor médio, desvio médio absoluto e o desvio padrão. Os dados individuais do desvio médio absoluto são então computados e divididos pelo o desvio padrão a fim de se determinar a proporção deste desvio (ΔV):

$$\Delta V = \frac{DM}{s} \quad \text{A.1}$$

Se a proporção do desvio de uma determinada leitura exceder o limite de desvio de referência, conforme indicado na Tabela A.1, estes dados devem ser rejeitados. O valor médio e o desvio padrão são novamente computados após a rejeição dos dados acima mencionados (BANERJEE, 2016; REDDY, 2011).

Tabela A.1 – Critério de Chauvenet (Desvio de referência).

Número de medidas n	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1.000	3,48

Valor Médio

A média aritmética ou média é um valor típico ou representativo de um conjunto de dados. Como esses valores típicos tendem a se localizar centralmente em um ponto de um conjunto de dado ordenados segundo suas grandezas, as médias também são denominadas medidas de tendência central. É dada pela soma dos valores medidos nas leituras dividido pelo número de leituras (BANERJEE, 2016; SPIEGEL e STEPHENS, 2009). É definido por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{A.2}$$

Onde x_1, \dots, \dots, x_n são os valores medidos e n é o número de leituras.

Medidas de dispersão

O grau para o qual os dados numéricos tendem a dispersar-se em torno de um valor médio é denominado de variação ou dispersão dos dados. Existem várias medidas de dispersão ou variação, sendo as mais comuns o desvio médio e desvio padrão.

Desvio Médio Absoluto

O desvio médio de um conjunto de N números x_1, \dots, \dots, x_n é abreviado por DM e é definido por:

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum |x - \bar{x}|}{n} = \overline{|x - \bar{x}|} \quad A.3$$

onde \bar{x} é a média aritmética dos números e $|x_i - \bar{x}|$ é o valor absoluto do desvio de x_i em relação a \bar{x} .

Desvio Padrão

O desvio médio de um conjunto de N números x_1, \dots, \dots, x_n é indicado por s e definido por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad A.4$$

onde x representa o desvio de cada um dos números x_i em relação a média \bar{x} . Assim, s é a raiz média quadrática dos desvios, em relação à média.